



**Bachelorarbeit des Studiengangs
Augenoptik / Augenoptik Hörakustik**

Entwicklung und Analyse einer Mess- methode zur Bestimmung des individuellen Insets mittels Kamera

Zugelassene Abschlussarbeit des Studiengangs Augenoptik und Hörakustik
zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science

vorgelegt von
Simon Weindel

Tag der Einreichung:

14.08.2016

Erstbetreuer: Prof. Dr. Ulrike Paffrath

Zweitbetreuer: Prof. Dr. Peter Baumbach

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorthesis selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine andere als die angegebene Literatur benutzt habe. Alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlehnenden Ausführungen meiner Arbeit sind besonders gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift

Abstract

In dieser Arbeit wird eine Messmethode zur Bestimmung der individuellen Pupillendistanz für den Nahbereich und des damit einhergehenden individuellen Insets entwickelt.

Bei der Methode handelt es sich um Kameramessungen in einer definierten Prüfdistanz von 400 mm. Die Fixation erfolgt auf eine Fixationsmarke, die zentrisch vor dem Kameraobjektiv angebracht ist. Je Messreihe werden zehn Einzelmessungen durchgeführt, deren Mittelwert für die weiteren Vergleiche herangezogen wird.

Die Methode wird durch verschiedene Messungen an insgesamt drei Probanden und einem Kunstkopf untersucht und deren Ergebnisse werden mittels Vergleichsmessungen traditioneller Messmethoden auf Plausibilität geprüft.

Der Mittelwert über die Standardabweichungen der gemessenen Pupillendistanzen aller Messreihen beträgt 0,04 mm.

Im weiteren Verlauf werden verschiedene Korrekturfaktoren hergeleitet, die Messungenauigkeiten wie beispielsweise den perspektivischen Fehler ausgleichen.

Die Abweichungen zwischen den aus diesen Messungen berechneten Insets und den geometrisch berechneten Insets liegen in einem Bereich von 0,05 mm bis 0,38 mm.

Die Ergebnisse aller Messungen zeigen zudem für die drei untersuchten Probanden einen kleineren binokularen Inset von 3,21 mm bis 4,18 mm auf als der für Standard-Gleitsichtgläser verwendete Inset von insgesamt 4,0 mm bis 5,0 mm.

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei Frau Prof. Dr. Ulrike Paffrath für die ausgezeichnete Betreuung dieser Arbeit bedanken. All die hilfreichen Anregungen, das aufgebrachte Engagement und die zügige Kommunikation haben mich in meiner Arbeit stetig vorangebracht. Auch die gemeinsamen Gespräche haben mich stets inspiriert und auf neue, eigene Gedanken gebracht.

Ebenso danke ich Herrn Reinhard Liebhäußer für seine Unterstützung in technischen Angelegenheiten. Ohne seine hilfreichen Ratschläge und die Herstellung maßgefertigter Bauteile für meinen Versuchsaufbau hätte die Arbeit nicht in ihrer Präzision und Güte durchgeführt werden können.

Überdies danke ich Herrn Prof. Dr. Peter Baumbach für die kurzfristige Mitbetreuung meiner Arbeit. Trotz seiner knapp bemessenen Zeit hat er ohne lange Überlegung direkt zugesagt. Darüber hinaus stand er mir bei gelegentlichen Fragen stets zur Seite und gab mir wertvolle Informationen.

Ferner möchte ich mich bei allen Kommilitonen, Mitarbeitern und Professoren des Studiengangs für das hervorragende Arbeitsklima in der Hochschule bedanken, ohne dem mir die tägliche Arbeit nicht ansatzweise so viel Freude bereitet hätte.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie von ganzem Herzen für ihre uneingeschränkte Unterstützung, den Rückhalt und die vielen motivierenden Worte danken, ohne all dem mein Studium und vieles mehr in dieser Form nicht möglich gewesen wären. Vielen, vielen Dank für alles!

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	I
Abstract	II
Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Formelzeichen	VII
Abkürzungen.....	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ziel.....	6
2 Material und Methoden	7
2.1 Ausgangspunkt	7
2.1.1 Satz von Minkwitz.....	7
2.1.2 Sehfeldbreite	9
2.1.3 Geometrischer Inset	11
2.1.4 Totaler Inset	12
2.1.5 Einfluss von VN und FSW	14
2.1.6 Akkommodation.....	16
2.2 Versuchsaufbau	18
2.2.1 Versuchsaufbau Kameramessungen	19
2.2.2 Messaufsatz	27
2.2.3 Probanden.....	28
2.2.4 Fassungen.....	29
2.2.5 Messung von VN, HSA und FSW	31
2.2.6 Bestimmung des Führungsauges.....	32
2.2.7 Messung der Fern-PD	33
Pupillometer	33
Viktorin-Methode	34
2.2.8 Messung der Nah-PD	35

Pupillometer	35
Spiegelmethode	36
Spiegelmethode mittels Kamera	39
Direkte Kameramessung.....	42
Direkte Kameramessung mit Landoltring	45
2.3 Vorgehen	48
2.3.1 Auswertung der Fotos	48
2.3.2 Vergleich der Pupillendistanzen	52
2.3.3 Korrektur des perspektivischen Fehlers	61
2.3.4 Formel zur Korrektur des gemessenen PD-Insets.....	62
3 Messungen und Auswertungen	64
3.1 Probandendaten	64
3.2 Messungen ohne Kamera.....	65
3.2.1 Messung der Fern-PD (Pupillometer).....	65
3.2.2 Messung der Nah-PD (Pupillometer).....	67
3.2.3 Messung der Nah-PD (Spiegelmethode).....	68
Vergleich Nah-PDs (Pupillometer und Spiegelmethode).....	69
Vergleich der Insets (Pupillometer und Spiegelmethode).....	71
3.3 Messungen mit Kamera	72
3.3.1 Messungen der Nah-PD (Direkte Kameramessung)	72
3.3.2 Kameramessung verschiedener Distanzen am Kunstkopf.....	73
3.3.3 Genauigkeit innerhalb der Messreihen	78
3.4 Berechnung des geometrischen Insets.....	81
3.5 Umrechnung von Iris- auf Brillenglasebene	83
Vergleich mit den geometrischen Insets	84
Vergleich der Insets (Kamera mit Pupillometer <i>und</i> Spiegelmethode).....	86
3.6 Weitere Messergebnisse	88
4 Zusammenfassung der Ergebnisse	90
5 Diskussion	95

6 Schlussfolgerung und Ausblick.....	102
Literaturverzeichnis.....	103
Abbildungsverzeichnis	105
Tabellenverzeichnis	109
Anhang.....	110

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	dpt	Flächenastigmatismus
a	mm	Objektentfernung
a_E	m	Einstellentfernung
A_E	dpt	Einstellrefraktion
ΔA_{max}	dpt	Maximaler Akkommodationserfolg
a_{Steg}	mm	Strecke zwischen Kameraobjektiv und Referenzsteg
Add	dpt	Addition
α	'	Sehwinkel in Winkelminuten
β	°	Kopfdrehungswinkel
γ	°	Monokularer Konvergenzwinkel
b	--	Y-Achsenabschnitt
c	cm	Dezentrationsstrecke vom optischen Mittelpunkt
D	dpt	Flächenbrechwert
e	mm	Hornhautscheitelabstand
e_V	mm	Vorderkammertiefe
e_Z	mm	Abstand zwischen Hornhautscheitel und Augendrehpunkt
$Inset$	mm	Inset auf Brillenglasebene
$Inset_{total}$	mm	Geometrischer Inset unter Berücksichtigung der prismatischen Nebenwirkung
$Inset_{geom_Bgl}$	mm	Geometrisch berechneter Inset auf Brillenglasebene
$Inset_{geom_Iris}$	mm	Geometrisch berechneter Inset auf Irisblattebene
l_P	mm	Länge des Progressionskanals
m	rad	Steigung der Geraden
n_{pix_PD}	--	Anzahl der Pixel über die Strecke der Pupillendistanz
n_{pix_Steg}	--	Anzahl der Pixel über die Strecke des Referenzstegs
P	cm/m	Prismatische Wirkung
PD_{mon}	mm	Monokulare Pupillendistanz für die Ferne
PD_F	mm	Pupillendistanz für die Ferne
PD_N	mm	Pupillendistanz für die Nähe
PD_{N_Foto}	mm	Perspektivisch <i>nicht</i> korrigierte Pupillendistanz der Probanden – aus den Fotos
PD_{N_Iris}	mm	Perspektivisch korrigierte Pupillendistanz auf Irisblattebene der Probanden – aus den Fotos
$PD_{N_gemessen}$	mm	Perspektivisch korrigierte Pupillendistanz des Kunstkopfes – aus den Fotos
$PD_{N_tatsächlich}$	mm	Pupillendistanz des Kunstkopfes nach Korrektur des Kamerafehlers

$PD_{F_au\ddot{a}u\ddot{e}n_alt}$	mm	Monokulare Pupillendistanz des kopfdrehungs-äußeren Auges für die Ferne, vor der Kopfdrehung
$PD_{F_au\ddot{a}u\ddot{e}n_neu}$	mm	Monokulare Pupillendistanz des kopfdrehungs-inneren Auges für die Ferne, nach der Kopfdrehung
$PD_{N_au\ddot{a}u\ddot{e}n_neu}$	mm	Monokulare Pupillendistanz des kopfdrehungs-äußeren Auges für die Nähe, nach der Kopfdrehung
$PD_{N_innen_neu}$	mm	Monokulare Pupillendistanz des Kopfdrehungs-inneren Auges für die Nähe, nach der Kopfdrehung
PD_Inset	mm	Perspektivisch <i>nicht</i> korrigierter Inset auf Irisblattebene
PD_Inset_{korrr}	mm	Perspektivisch korrigierter Inset auf Irisblattebene
s	mm	Bogenlänge entlang der Nabellinie
$S_{\ddot{A}}$	dpt	Sphärisches Äquivalent
S'	dpt	Scheitelbrechwert
$S'_{N\ddot{a}he}$	dpt	Scheitelbrechwert im Nahbereich
t	--	Berechneter t-Wert aus dem t-Test für abhängige Stichproben
$t_{df; \alpha}$	--	Kritischer t-Wert aus der t-Tabelle für zweiseitige Fragestellungen
$t_{3; 0,05}$	--	Kritischer t-Wert aus der t-Tabelle für zweiseitige Fragestellungen bei 3 Freiheitsgraden auf dem 5%-Signifikanzniveau
x	mm	Strecke senkrecht zur Nabellinie
V	$\frac{1}{r}$	Visusanforderung

Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
B _F	Bezugspunkt Ferne
B _N	Bezugspunkt Nähe
PD	Pupillendistanz
Fern-PD	Pupillendistanz für die Ferne
Nah-PD	Pupillendistanz für die Nähe
MW	Mittelwert
Stabw	Standardabweichung
SD	Standard Deviation
HSA	Hornhautscheitelabstand
FSW	Fassungsscheibenwinkel
VN	Vorneigung
Z'	Augendrehpunkt
Sph	Sphäre
Cyl	Zylinder
A	Achse
Bgl.	Brillenglas
KSS	Kinn-/Stirn-Stütze
v.	von
n.	nach
s.	siehe
R	Rechts
L	Links

1 Einleitung

Im Jahr 2015 besaßen 66,5% der deutschen Bevölkerung ab 14 Jahren eine Brille zur Korrektur einer Fehlsichtigkeit, wovon 28,2% im Besitz einer reinen Lesebrille zur Korrektur einer Presbyopie waren (VuMA 2016). Ein bestimmter Anteil dieser Personengruppe, dessen prozentualer Zahlenwert nicht exakt vorliegt, trägt eine Gleitsichtbrille. Um den Brillenträgern eine bestmögliche Sehqualität zu gewährleisten, ist eine präzise Brillenanpassung und -zentrierung von entscheidender Bedeutung. Wohingegen geringfügige Dezentrationen von Einstärkengläsern, je nach dioptrischer Wirkung, meist „lediglich“ asthenopische Beschwerden ohne einen gravierenden Visusabfall zur Folge haben können (Grehn, F. 2006), kommt es bei falsch zentrierten Gleitsichtgläsern in den Randbereichen bereits häufig zu einem Abfall der Sehleistung und damit zu einer spürbaren Verkleinerung des gemeinsamen binokularen Sehfeldes (Methling, D. 2013). Dies liegt in der Natur des progressiven Flächendesigns zwischen dem dioptrischen Fern- und Nahwert. Bei Gleitsichtgläsern ändert sich der Scheitelbrechwert vom Fernbezugspunkt entlang einer Verbindungslinie zum Nahbezugspunkt stetig in mathematisch positiver Richtung. Dadurch treten unvermeidlich in den peripheren Bereichen seitlich dieser progressiven Zone zu den Seiten ansteigend Flächenastigmatismus, Abweichungen von der Refraktionsrichtigkeit und Verzeichnung auf (Methling, D. 2013). Hierdurch entstehen schmale, für gutes Sehen nutzbare Bereiche entlang dieser Verbindungslinie, innerhalb welcher der individuell beste Visus erreicht werden kann.

Die Verbindungslinie, auch Hauptmeridian oder Hauptlinie genannt, welche Fern- und Nahbezugspunkt miteinander verbindet, verläuft leicht geschwungen zum Nahbereich hin, da die Augen beim Blick von der Ferne in die Nähe konvergieren, sodass für jedes Auge separat ein Seitenversatz des Nahbereichs gegenüber dem Fernbereich in nasaler Richtung entsteht. Dieser seitliche Versatz zwischen Fern- und Nahbereich ist der Inset. Bei den meisten standardisierten Gleitsichtgläsern beträgt der Inset 2,0 mm bis 2,5 mm (Baumbach, P. 2016). Für ein optimales Sehen in allen Entfernungen sollten Hauptmeridian und Hauptsehlinie idealerweise exakt übereinanderliegen (Kalder, D. 2003). Dies hängt allerdings von mehreren Faktoren ab. Eine der wohl entscheidendsten Einflussgrößen hierfür ist eine von vornherein korrekte Brillenglaszentrierung.

Eine korrekte Zentrierung setzt zunächst grundsätzlich eine exakte Messung der individuellen Zentrierdaten für die Ferne voraus. Diese setzen sich in horizontaler Richtung aus der jeweiligen monokularen Pupillendistanz für die Ferne und in vertikaler Richtung aus der jeweiligen Einschleifhöhe des rechten und linken Glases zusammen. Obwohl die vertikale Zentrierung zwar auch eine gewisse Rolle bei der Koinzidenz von Hauptsehlinie und Hauptmeridian spielt, wirkt sich hier die horizontale Zentrierung, sprich die korrekte Einarbeitung der exakten Fern-PD, am stärksten darauf aus.

Desweiteren hat auch die individuelle Konvergenz großen Einfluss auf die Übereinstimmung von Hauptmeridian und Hauptsehlinie und der damit verbundenen maximalen binokularen Nutzbarkeit der Sehbereiche innerhalb des Gleitsichtglases. Um den Inset zu erhalten, muss zusätzlich die individuelle Nah-PD gemessen und die Differenz zur Fern-PD gebildet werden. Die tatsächliche Größe des Insets hängt zudem von weiteren Faktoren ab, auf welche in später folgenden Kapiteln genauer eingegangen wird.

Im Februar 2010 wurde die neue, weltweit gültige Norm zur Brillenglaszentrierung *DIN EN ISO 21987* eingeführt. Hierin sind die aktuellen Grenzabweichungen für die Brillenglaszentrierung von Gleitsichtgläsern festgelegt. Laut dieser Norm darf die horizontale Anpasspunktlage (Ferne) jedes der beiden Brillengläser vom verordneten monokularen Zentrierpunkt Abstand um nicht mehr als ± 1 mm abweichen (Wesenmann, W. et al. 2010). Damit diese Norm Sinn macht, muss der verordnete Zentrierpunkt Abstand auch den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen. Doch wie genau lässt sich die „wahre“ Pupillendistanz bestimmen?

Zur Messung der Pupillendistanzen für die Ferne und teilweise auch für die Nähe wurden bereits einige Studien durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden. Bei der Betrachtung der Ergebnisse und Streumaße wird deutlich, dass die Genauigkeit der Messungen stark von der jeweiligen Messmethode (Pupillenmitte oder –reflex), vom verwendeten Messgerät und auch vom Messenden selbst abhängt.

Dass die Pupillendistanz interindividuell stark variiert, zeigt eine statistische Analyse, durchgeführt von Neil Anthony Dodgson, bei der Pupillendistanzen von insgesamt 3976 Probanden aus mehreren Studien ausgewertet wurden. Diese

wurden nach Pupillenmitte gemessen; zur Art der verwendeten Messgeräte gibt es keine Angaben. Das Minimum liegt bei 52 mm, das Maximum bei 78 mm, der Mittelwert über alle Probanden beträgt 63,36 mm bei einer Standardabweichung von $\pm 3,83$ mm (Dodgson, N. A. 2004).

Der Unterschied zwischen der PD-Messung nach Pupillenmitte und Hornhautreflex wurde ebenfalls in mehreren Studien untersucht. Saud A AlAnazi et al. beschreiben den Abstand zwischen den Hornhautreflexen als Abstand der visuellen Achsen zueinander, welcher der physiologischen PD entspricht, und den Abstand zwischen den Pupillenmitten als Abstand der optischen Achsen zueinander, welcher der anatomischen PD entspricht (A AlAnazi, S. et al. 2013). In der Studie wurden die binokularen Pupillendistanzen von 133 Probanden sowohl für die Ferne als auch für die Nähe jeweils einmal nach Pupillenmitte mittels PD-Stab und einmal nach Pupillenreflex mittels Pupillometer gemessen. Für die Messung der Fern-PD mittels PD-Stab (Pupillenmitte) wurde ein Mittelwert über alle 133 Probanden von 62,5 mm mit einer Standardabweichung von 3,2 mm ermittelt, die Messungen mittels Pupillometer (Hornhautreflex) ergaben einen Mittelwert von 62,8 mm mit einer Standardabweichung von 3,2 mm. Die Messungen der Nah-PD ergaben mittels PD-Stab einen MW \pm Stabw von $58,1 \pm 3,4$ mm und mittels Pupillometer einen MW \pm Stabw von $58,2 \pm 3,4$ mm. Die Messungen der Nah-PD wurden mittels PD-Stab in Armlänge und mittels Pupillometer bei einer Einstellung auf 40 cm durchgeführt. Die Differenz zwischen Fern- und Nah-PD betrug im Mittel für die Messungen 4,4 mm nach Pupillenmitte und 4,6 mm für die Messungen nach Hornhautreflex (A AlAnazi, S. et al. 2013).

In einer weiteren Studie, durchgeführt von Wolfgang Wesemann et al., wurden die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit verschiedener PD-Messgeräte und die Unterschiede zwischen der Zentrierung auf Pupillenmitte bzw. auf Hornhautreflex für die Gesamt-PD an 30 Probanden untersucht. Die Reproduzierbarkeit schwankte in der Standardabweichung der neun Wiederholungsmessungen (gemittelt über alle Probanden) zwischen $\pm 0,31$ mm (Zeiss Video-Infral) und $\pm 0,74$ mm (PD-Stab). Für den Vergleich zwischen der PD-Messung nach Pupillenmitte und Hornhautreflex wurden die Zentriermarken der Videozentriersysteme sowohl auf Pupillenmitte als auch auf Hornhautreflex ausgerichtet. Beim Vergleich der Pupillendistanzen, gemessen nach Pupillenmitte und nach Hornhautreflex,

ergab sich über alle Geräte im Mittel eine um 0,51 mm kleinere Gesamt-PD bei der Messung nach Hornhautreflex. Die Unterschiede zwischen beiden Arten der PD-Messung variierten jedoch zwischen ca. 0 bis 1 mm (Wesemann, et al. 1997).

In einer weiteren Veröffentlichung beschäftigt sich Wesemann mit der Lage der lichtenergetischen „Mitte“ der Augenpupille. Hierzu wurde der Stiles-Crawford-Effekt genauer betrachtet und Berechnungen zum Schwerpunkt der von den foveolaren Photorezeptoren absorbierten Lichtmenge angestellt. Aus seiner Arbeit geht hervor, dass der zum Maximum des Stiles-Crawford-Effekts konjugierte Punkt innerhalb der Pupille nicht mit der geometrischen Pupillenmitte übereinstimmt. Er befindet sich in horizontaler Richtung $0,51 \pm 0,72$ mm nasal und in vertikaler Richtung $0,20 \pm 0,64$ mm superior exzentrisch zur geometrischen Pupillenmitte. Desweiteren kommt Wesemann zu dem Schluss, dass die Pupillenreflexmethode eine im Mittel um 0,5 mm kleinere PD liefert als die Pupillenmittenmethode, dass die Brillenglaszentrierung idealerweise auf den lichtenergetischen Schwerpunkt der Pupille erfolgen sollte und dass die exakte Position des lichtenergetischen Schwerpunkts von der jeweiligen Pupillengröße abhängt und irgendwo in der Nähe zwischen Pupillenmitte und Hornhautreflex liegt (Wesemann, W. 1996).

Osubeni und Al-Fahdi stießen in einer Studie auf ähnliche Ergebnisse. In ihren Untersuchungen an 400 Probanden kamen sie zu der Erkenntnis, dass die visuelle Achse (physiologische PD) und die optische Achse (anatomische PD) des Auges nicht in Koinzidenz liegen. Visuelle und optische Achse schneiden sich im Knotenpunkt des Auges, wobei die visuelle Achse das betrachtete Objekt und die Fovea miteinander verbindet. Am Einzelauge ist die visuelle Achse gegenüber der optischen Achse in der Pupille im Mittel um 0,25 bis 0,50 mm in nasale Richtung versetzt. Für beide Augen bedeutet dies, dass die anatomische PD für gewöhnlich 0,50 bis 1,00 mm größer ist als die physiologische PD (Osubeni, E.P. et al. 1994).

Zudem ist die Lage der geometrischen Pupillenmitte nicht konstant. Yang et al. fanden heraus, dass der geometrische Mittelpunkt der Pupille meistens in temporale Richtung wandert, wenn sich die Pupille vergrößert. Dies liegt daran, dass

sich die Iris unsymmetrisch öffnet. Diese Verschiebung der geometrischen Pupillenmitte betrug bei den meisten Personen etwas weniger als 0,3 mm (Yang Y. et al. 2002).

In einer 1999 von Holland und Siderov veröffentlichten Studie wurde ebenfalls die PD-Messung nach Pupillenmittenmethode (PD-Stab) und Hornhautreflexmethode (Pupillometer) untersucht. Zunächst wurden alle 49 Probanden von einem Untersucher auf beide Arten gemessen. Hierbei ergab sich über alle Probanden ein $MW \pm Stabw$ für die Gesamt-PD von $61,51 \pm 0,58$ mm nach Pupillenmittenmethode und $60,47 \pm 0,48$ mm nach Hornhautreflexmethode. In einem weiteren Versuch wurden alle 49 Probanden jeweils von 35 verschiedenen Untersuchern gemessen. Hierbei ergab sich für alle Probanden und Messreihen ein $MW \pm Stabw$ für die Gesamt-PD von $62,59 \pm 1,90$ mm nach Pupillenmittenmethode und $62,10 \pm 1,54$ mm nach Hornhautreflexmethode (Holland, B.J. et al. 1999).

In einer weiteren Reproduzierbarkeitsstudie untersuchte Wesemann verschiedene Videozentriersysteme und Pupillometer im Vergleich. Dabei wurden neun Probanden mit insgesamt acht Messgeräten (vier Videozentriersysteme und vier Pupillometer) verschiedener Hersteller jeweils fünf Mal gemessen. Der Mittelwert der Standardabweichungen über alle Videozentriersysteme betrug $\pm 0,18$ mm und über alle Pupillometer $\pm 0,34$ mm (Wesemann, W. 2009).

Dass die Messung der Pupillendistanz auch stark vom Untersucher selbst abhängt, zeigen zwei weitere Studien. In einem Versuch ließ Markus Knopp die PD ein und desselben Probanden auf zwei verschiedene Arten von insgesamt 21 Augenoptikern messen. Die PD wurde sowohl mittels Zentrierkreuzen in einer Messbrille (Viktorin) als auch mittels Pupillometer gemessen. Über alle 21 Untersucher ergab sich für die Gesamt-PD ein $MW \pm Stabw$ von $66,69 \pm 1,89$ mm mittels Messbrille und $67,93 \pm 0,51$ mm mittels Pupillometer (Knopp, M. 2015).

Auch Walsh et al. untersuchten die Messgenauigkeit von insgesamt 54 Untersuchern an einem Probanden. Hierzu wurde die PD mittels PD-Stab gemessen. Die Untersuchung ergab einen Mittelwert für die Gesamt-PD von 67,65 mm, wobei der größte gemessene Wert 72 mm und der kleinste gemessene Wert 63 mm an ein und demselben Probanden ergab. Die Standardabweichung lag in dieser Studie bei $\pm 1,54$ mm (Walsh, G. et al. 2009).

1.1 Motivation und Ziel

Bei Betrachtung der Ergebnisse dieser Studien zeigt sich, dass die Messung der Pupillendistanz durchaus mit Schwierigkeiten verbunden ist und letztlich keine konkrete Aussage über die „wahre“ PD getroffen werden kann. Da, wie oben bereits erwähnt, die horizontale Zentrierung, die Konvergenz und die damit verbundene ideale Ausnutzung der Sehfelder gerade bei Gleitsichtbrillen eine der einflussreichsten Messgrößen für die Qualität des binokularen Sehens darstellt, wird jene in dieser Arbeit genauer untersucht. Das Augenmerk richtet sich speziell auf die Messung der Nah-PD und des individuellen Insets, da es zu dieser Thematik noch recht wenig in der Literatur zu finden gibt. Dabei sollen die Messergebnisse mit der theoretischen Berechnung am Augenmodell verglichen werden und auf Plausibilität geprüft werden. Diese Thematik, die Messung des individuellen Insets, wurde 2015 bereits im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht, jedoch traten bei den Messungen einige unvorhergesehene Schwierigkeiten auf, sodass die Ergebnisse teilweise sehr große Streuweiten aufzeigten (Frost, A., Rippich, N. 2015: Messung des individuellen Insets bei Probanden im Nahbereich, Hochschule Aalen, Studiengang Augenoptik). Deshalb findet in dieser Arbeit ein neues Gerät Anwendung, mithilfe dessen die Messungen genauer durchgeführt werden sollen. Desweiteren werden die Messaufbauten leicht optimiert, um genauere Ergebnisse mit geringeren Streumaßen zu erhalten.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Messmethode, mit welcher der individuelle Inset ermittelt werden kann. Hierzu dienen eine Kamera und ein vorab geplanter Versuchsaufbau. Die Messmethode wird in dieser Arbeit auf ihre Realisierbarkeit analysiert und validiert. Da der Inset allerdings zusätzlich von weiteren Faktoren als der reinen gemessenen Nah-PD, wie beispielsweise dem individuellen HSA, der jeweiligen Pupillendistanz für die Ferne und einigen physiologischen Faktoren abhängt, soll überdies eine Formel hergeleitet werden, mithilfe derer der genaue individuelle Inset bestimmt werden kann.

2 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die eingesetzten Geräte, die verschiedenen Versuchsaufbauten sowie einige Grundlagen bezüglich der Funktionsweise von Gleitsichtgläsern genauer erläutert.

2.1 Ausgangspunkt

Zunächst werden einige theoretische Grundlagen in Bezug auf Gleitsichtgläser und die binokulare Lesesituation betrachtet. Ferner wird auf verschiedene zu berücksichtigende Parameter, deren Zusammenhang und ihre Auswirkung auf den Inset genauer eingegangen.

2.1.1 Satz von Minkwitz

Wie in Kapitel 1 bereits erwähnt, kommt bei Gleitsichtgläsern für die optimale Ausnutzung der Sehbereiche und der damit verbundenen maximalen Größe des binokularen Sehfelds eine möglichst präzise Brillenanpassung und -zentrierung besonders zum Tragen. Die örtliche, horizontale Einschränkung der – für „gutes“ Sehen – nutzbaren Bereiche ist der progressiven Änderung der dioptrischen Wirkung durch stetige Änderung der Flächenradien entlang der ombilischen Linie innerhalb des Gleitsichtglases geschuldet. Durch die progressive Stärkenänderung entsteht senkrecht zur ombilischen Linie ein schmaler refraktionsrichtiger, nutzbarer Korridor (Progressionsbereich), seitlich dessen unvermeidlich zu den Seiten ansteigend Flächenastigmatismus, Abweichungen von der Refraktionsrichtigkeit und Verzeichnung auftreten (Methling, D. 2013). Die nutzbare Breite des Progressionsbereichs wird durch den Satz von Minkwitz in Formel 2.1 beschrieben. Genau genommen gilt diese Gesetzmäßigkeit nur für ombilische Linien. In modernen Gleitsichtgläsern werden jene allerdings nicht mehr verwendet; hier gibt es lediglich Hauptmeridiane.

$$\frac{\partial A}{\partial x} = 2 * \frac{\partial D}{\partial s} \quad (2.1)$$

A = Flächenastigmatismus [dpt]

x = Strecke senkrecht zur Nabellinie [mm]

D = Flächenbrechwert [dpt]

s = Bogenlänge entlang der Nabellinie [mm]

Dieses Gesetz gilt für alle Gleitsichtflächen mit einer ombilischen Hauptlinie. Praktisch sagt es nur im Bereich von etwa ± 5 mm um die ombilische Linie den astigmatischen Fehler voraus (Baumbach, P. 2014).

In der Praxis können die Ableitungen durch Differenzenquotienten ersetzt werden, wenn davon ausgegangen wird, dass sowohl der Brechwert linear entlang der Nabellinie als auch der Astigmatismus linear ansteigen (Kalder, D. 2003).

Daraus ergibt sich die Näherungsformel 2.2

$$\frac{\Delta A}{\Delta x} = 2 * \frac{\Delta D}{\Delta s} \approx 2 * \frac{Add}{l_p} \quad (2.2)$$

Add = Addition [dpt]

l_p = Länge des Progressionsbereichs [mm]

Wird obige Formel nach $2\Delta x$ umgestellt, lässt sich die nutzbare Gesamtbreite des Progressionsbereichs (nasal *und* temporal der ombilischen Linie) näherungsweise in Millimetern ermitteln. Dies ist der Bereich im Glas, innerhalb dessen ein bestimmter Flächenastigmatismuswert nicht überschritten wird. Hierzu muss in Formel 2.3 der Flächenastigmatismus ΔA angegeben werden, der gerade noch toleriert werden kann. Praxisorientierte Werte für ΔA sind 0,50 dpt bis 0,75 dpt (Baumbach, P. 2014).

$$2\Delta x \approx \frac{l_p * \Delta A}{Add} \quad (2.3)$$

Aus Formel 2.3 lässt sich nun ableiten, dass der Progressionsbereich eines Gleitsichtglases umso schmaler wird, je höher seine Addition ist und je kürzer sein Progressionsbereich ist. Umgekehrt wird der Progressionsbereich eines Gleitsichtglases umso breiter, je geringer seine Addition ist und je länger sein Progressionsbereich ist (Kalder, D. 2003).

2.1.2 Sehfeldbreite

Unter Vernachlässigung der Strahlenbrechung durch die Brillengläser lässt sich über den Dreisatz (Formel 2.4) nun unter Zuhilfenahme des Augenmodells die monokulare Sehfeldbreite in Millimetern für eine bestimmte Objektentfernung a bei einer definierten Breite des Progressionsbereichs berechnen. In Abbildung 1 sind die dafür notwendigen Strecken grafisch dargestellt.

$$\text{Sehfeld} = \text{Breite Progressionsbereich} * \frac{a + e_z}{e + e_z} \quad (2.4)$$

a = Objektentfernung [mm]

e = HSA [mm]

e_z = Abstand zwischen Hornhautscheitel und Augendrehpunkt Z' [mm]

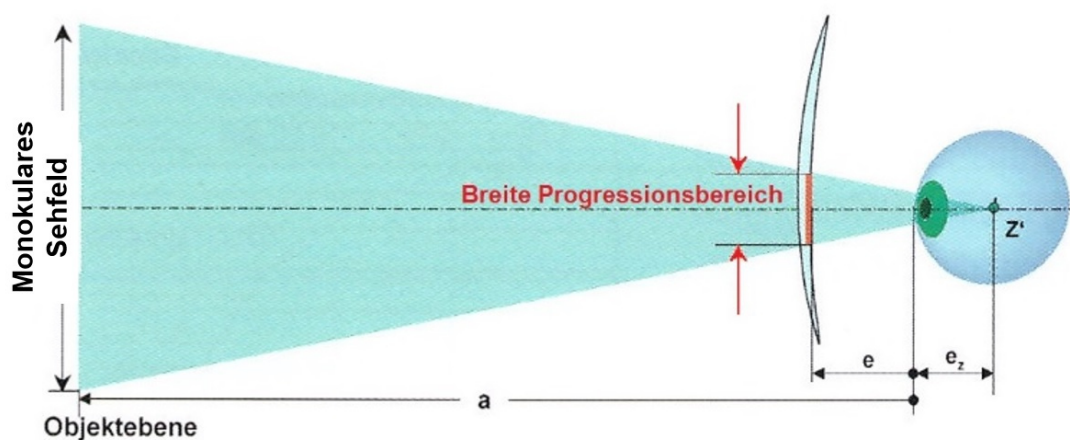


Abbildung 1 Grafische Darstellung der Sehfeldbreite bei definierter Breite des Progressionsbereichs (Bildquelle: Kalder, D. 2003: Gleitsichtgläser, Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie, Band 16, 25)

Da das System Brille-Auge üblicherweise binokular arbeitet, müssen die Sehfelder beider Augen in allen Entfernungen übereinanderliegen. Hierzu sollten im Idealfall die Hauptmeridiane, auch Hauptlinien genannt, beider Gleitsichtgläser mit den Konvergenzlinien beider Augen übereinstimmen, sodass die Sehbereiche

des Gleitsichtglaspaares symmetrisch zu den Fixierlinien vor den Augen angeordnet sind (Kalder, D. 2003). Ist dies nicht der Fall, kommt es zu einer Verkleinerung des binokularen Sehfeldes (Abbildung 2). Zudem wird bei einem Lesevorgang mit seitlichen Blickbewegungen immer ein Auge früher durch Unschärfe gestört als das andere Auge, was zu scheinbar unerklärlichen „Spannungen“ und vorzeitigem Ermüden der Augen führen kann (Baumbach, P. 2014).

Abbildung 3 zeigt im Vergleich eine symmetrische Anordnung der Sehbereiche zu den Fixierlinien. Daraus ergibt sich das weitest mögliche binokulare Sehfeld, das von beiden Augen gleich gut erfasst werden kann (Baumbach, P. 2014).

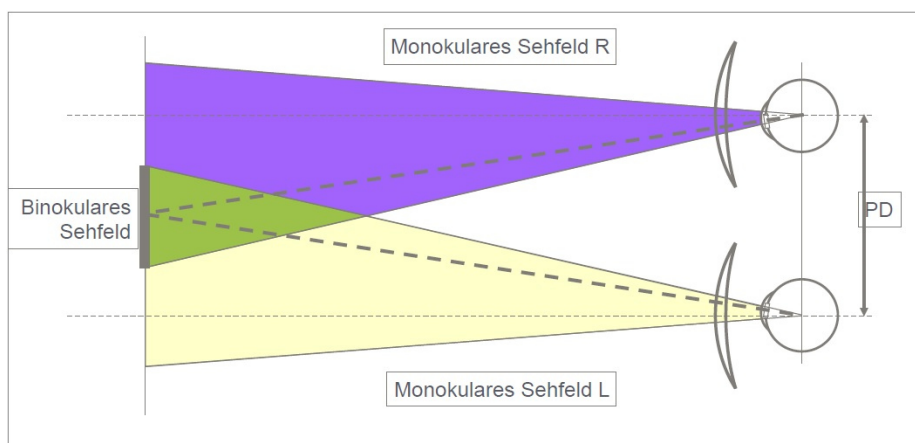


Abbildung 2 Asymmetrisch zu den Fixierlinien angeordnete Sehfelder (Bildquelle: Baumbach, P. 2014: Optik und Technik der Brille – Vorlesungsskript, Hochschule Aalen, Wintersemester 2014, 170)

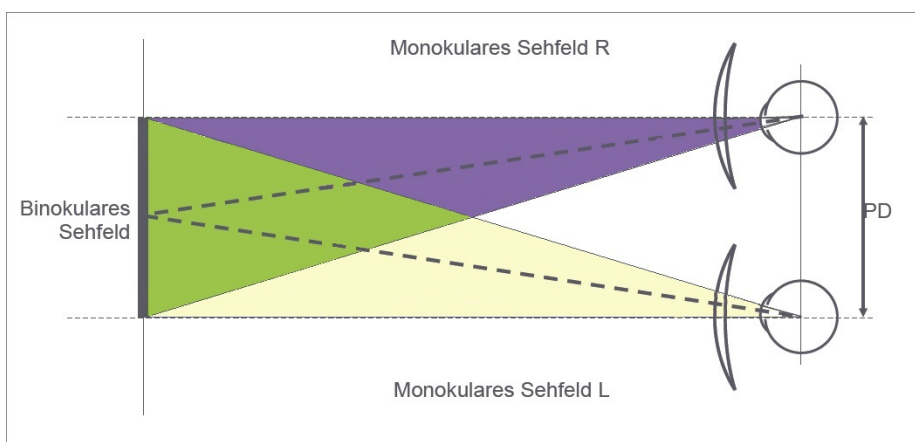


Abbildung 3 Symmetrisch zu den Fixierlinien angeordnete Sehfelder (Bildquelle: Baumbach, P. 2014: Optik und Technik der Brille – Vorlesungsskript, Hochschule Aalen, Wintersemester 2014, 175)

Wie bereits erwähnt, muss für die richtige Anordnung der Sehbereiche - und des damit verbundenen optimalen binokularen Sehzustandes – der Hauptmeridian des Gleitsichtglases der Hauptsehlinie des zugehörigen Auges *auf Brillenglas-ebene* entsprechen. Daraus ergibt sich, dass beim Lesen unter Nutzung des vollen Nahzusatzes auch die Mittelpunkte der Nahbereiche beider Gläser mit den tatsächlichen Durchblickspunkten für die Nähe koinzidieren müssen. Das setzt zunächst einen korrekt ermittelten (bzw. von den Glasherstellern korrekt angenommenen) Inset voraus. Der Inset hängt allerdings individuell stark von diversen Parametern ab, wie Leseentfernung, Fern-PD, HSA, Vorneigung, FSW, Wirkung und Akkommodation.

2.1.3 Geometrischer Inset

Der Zusammenhang der ersten drei aufgeführten Parameter ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

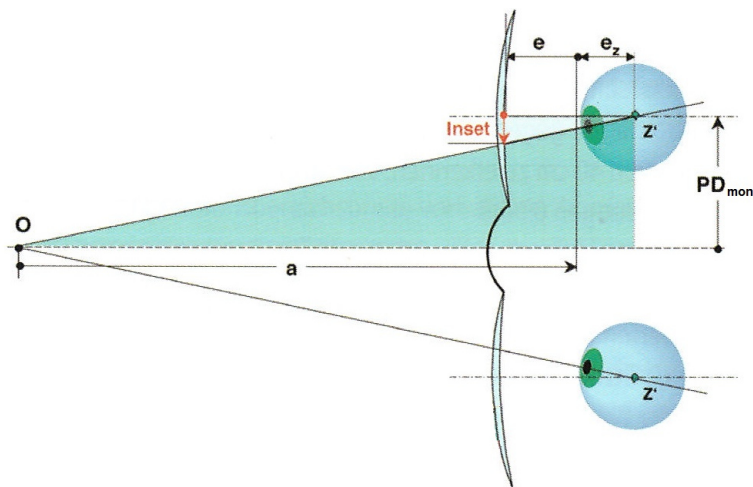


Abbildung 4 Schematische Darstellung des Augenmodells bei Betrachtung eines nahen Objekts (Bildquelle: Kalder, D. 2003: Gleitsichtgläser, Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie, Band 16, 30)

Sind Leseentfernung, monokulare Fern-PD und HSA bekannt, lässt sich der geometrische Inset über den Strahlensatz (Formel 2.5) berechnen. Um den Inset in Millimetern zu erhalten, ist darauf zu achten, dass alle Strecken ebenfalls in Millimetern eingesetzt werden.

$$Inset_{geom.} = \frac{(e + e_z) * PD_{mon}}{(a + e_z)} \quad (2.5)$$

Wohingegen die Strecke e_z zwischen Hornhautscheitel und Augendrehpunkt Z' bei Emmetropen mit einem Mittelwert von 13,5 mm angenommen wird, muss jene bei Längenametropen mittels Formel 2.6 über das sphärische Äquivalent $S_{\ddot{A}}$ der vorliegenden Fehlsichtigkeit gesondert berechnet werden (Diepes, H., Blendowske, R. 2005).

$$e_z = 13,5 \text{ mm} - 0,2 * \frac{S_{\ddot{A}}}{dpt} \quad (2.6)$$

Aus Formel 2.5 lassen sich, geometrisch betrachtet, verschiedene Erkenntnisse ableiten: Der Inset ist umso größer, je größer der HSA und/oder die Fern-PD und/oder je kleiner der Leseabstand sind. Diese Erkenntnisse gelten entsprechend auch umgekehrt.

2.1.4 Totaler Inset

Der geometrische Inset gilt allerdings nur, wenn die Brillengläser keine dioptrische Wirkung aufweisen. Haben die Gläser eine Wirkung, so wird, bedingt durch prismatische Nebenwirkungen, eine prismatische Wirkung im Durchblickspunkt des Brillenglases entstehen. Dieses Prisma erfordert eine andere Konvergenzstellung der Augen. Als *Faustformel* kann angenommen werden, dass *bei einer Prismendioptrie in horizontaler Richtung der Inset um 0,25 mm entgegengesetzt zur Basislage korrigiert* werden muss (Kalder, D. 2003). Das entstehende Prisma lässt sich mit der Prentice-Formel 2.7 berechnen.

$$P = c * S' \quad (2.7)$$

Um die prismatische Wirkung P in $\frac{cm}{m}$ zu erhalten, muss die horizontale Dezentrationstrecke c in cm und der Scheitelbrechwert im Nahbezugspunkt $S'_{Nähe}$ in $dpt = \frac{1}{m}$ eingesetzt werden.

Nach oben aufgeführter Faustformel ergeben sich folglich Formel 2.8 beziehungsweise Formel 2.9 zur Korrektur des geometrischen Inset bei Brillengläsern mit

dioptrischer Wirkung. Die prismatische Wirkung P ist in dieser Faustformel lediglich als *vorzeichenrichtiger Multiplikator ohne Einheit* einzusetzen. Gleiches gilt für die Dezentrationstrecke c und den Scheitelbrechwert im Nahbezugspunkt $S'_{Nähe}$ in Formel 2.9. Allerdings muss auf die richtige Kommastelle in *cm* geachtet werden.

$$Inset_{total} = Inset_{geom.} + P * 0,25 \text{ mm} \quad (2.8)$$

$$Inset_{total} = Inset_{geom.} + c [\text{cm}] * S'_{Nähe} * 0,25 \text{ mm} \quad (2.9)$$

Wird die horizontale Dezentrationstrecke c durch den geometrisch berechneten Inset ersetzt, so muss jener an dieser Stelle ebenfalls in *cm* eingesetzt werden. Zur Vereinfachung der Formel wird er nun in *mm* eingesetzt und ein zusätzlicher Multiplikator hinzugenommen, welcher die Nachkommastelle von *mm* auf *cm* berücksichtigt (Formel 2.10).

$$Inset_{total} = Inset_{geom.} + Inset_{geom.} [\text{mm}] * 0,1 * S'_{Nähe} * 0,25 \quad (2.10)$$

So lässt sich der totale Inset in Millimetern näherungsweise mit Formel 2.11 errechnen (Kalder, D. 2003).

$$Inset_{total} = Inset_{geom.} + Inset_{geom.} * S'_{Nähe} * 0,025 \quad (2.11)$$

$$Inset_{geom.} = \text{geometrischer Inset [mm]}$$

$$S'_{Nähe} = \text{Scheitelbrechwert im Nahbezugspunkt, vorzeichenrichtig}$$

Daraus lässt sich ableiten, dass das Auge bei einer negativen dioptrischen Wirkung im Nahbezugspunkt weniger Konvergenz aufbringen muss und somit ein kleinerer Inset erforderlich ist, wohingegen das Auge bei einer positiven dioptrischen Wirkung im Nahbezugspunkt mehr Konvergenz aufbringen muss und damit ein größerer Inset notwendig ist.

Der Einfluss oben beschriebener Parameter auf die Konvergenzlinie ist in Abbildung 5 nochmals grafisch dargestellt. Als Referenz dient jeweils die mittig

eingezeichnete Insetlinie, welche mittels Standardparametern berechnet und geplottet ist. Die Standardparameter sind mit folgenden Werten angenommen:

PD = 63 mm, HSA = 15 mm, VN = 8°, FSW = 4°, Leseentfernung = 400 mm. Zur grafischen Darstellung der mittigen Insetlinie ist für den Scheitelbrechwert 0,00 dpt angenommen (Kalder, D. 2003).

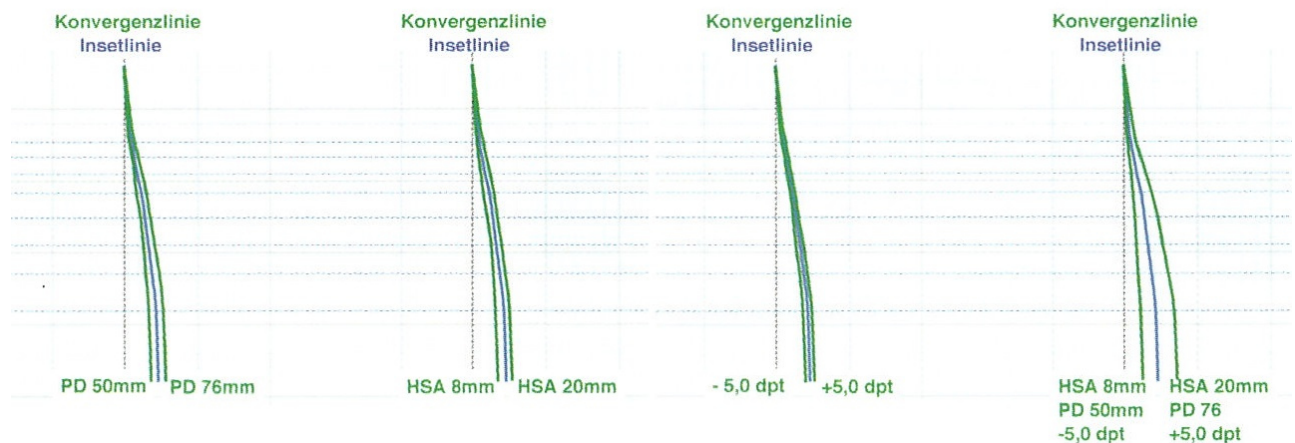


Abbildung 5 Grafische Darstellung der Konvergenzlinie bzw. Hauptsehlinie (jeweils die äußeren Linien) bei Abweichung verschiedener Parameter von der Insetlinie bzw. dem Hauptmeridian mit Standardparametern (jeweils die mittige Linie). Auswirkung der Fern-PD (links), des HSA (zweite v. links), des Scheitelbrechwerts (zweite v. rechts) und aller drei zusammen (rechts) auf die Konvergenzlinie (Bildquelle: Kalder, D. 2003: Gleitsichtgläser, Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie, Band 16, 58)

2.1.5 Einfluss von VN und FSW

Auch die Vorneigung der Brille wirkt sich sowohl auf die Blicksenkung als auch auf den Abstand der Cornea zum Brillenglas im Nahbezugspunkt B_N aus. Mit zunehmender Vorneigung wird dieser Abstand in B_N kleiner und die notwendige Blicksenkung größer. Dies gilt entsprechend auch umgekehrt, sodass mit abnehmender Vorneigung der Abstand in B_N größer und die notwendige Blicksenkung geringer werden (Kalder, D. 2003). Dies ist in Abbildung 6 dargestellt. Wird der Zusammenhang zwischen HSA und Inset betrachtet (Kapitel 2.1.3), lässt sich folgern, dass der Inset umso kleiner wird, je stärker die Vorneigung der Brille ist

beziehungsweise, dass der Inset umso größer wird, je geringer die Vorneigung der Brille ist.

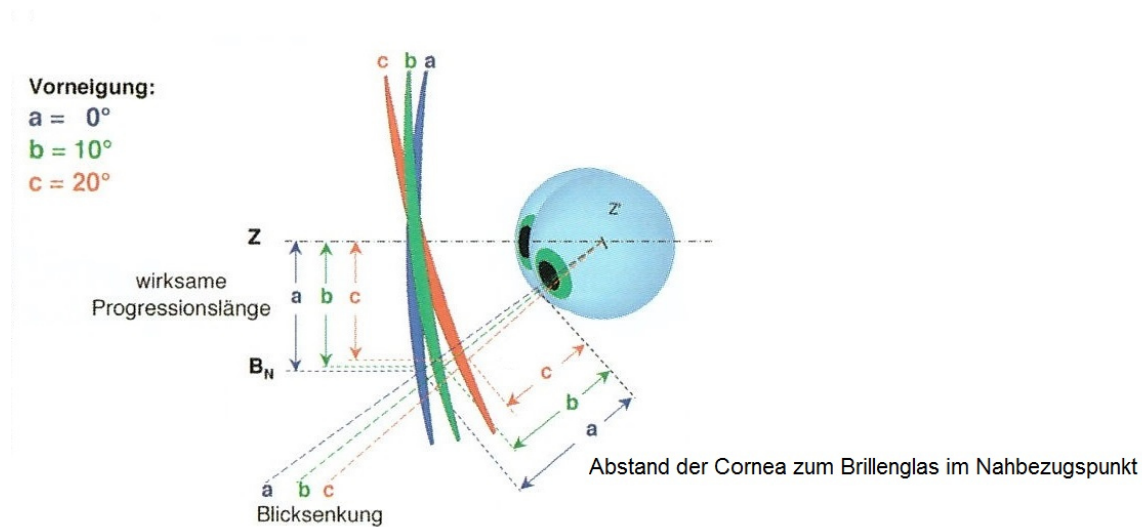


Abbildung 6 Auswirkung der Vorneigung auf die notwendige Blicksenkung und den Abstand der Cornea zum Brillenglas im Nahbezugspunkt (Bildquelle: Kalder, D. 2003: Gleitsichtgläser, Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie, Band 16, 123)

Ferner hat der Fassungsscheibenwinkel Einfluss auf die Größe des Insets. In Abbildung 7 wird dies überspitzt dargestellt. Beim Vergleich wird deutlich, dass mit zunehmendem FSW der Inset größer wird beziehungsweise der Inset mit abnehmendem FSW kleiner wird. In der Praxis ist diese Auswirkung auf den Inset bei konventionellen Brillenfassungen in der Regel nicht besonders gravierend (Kalder, D. 2003).

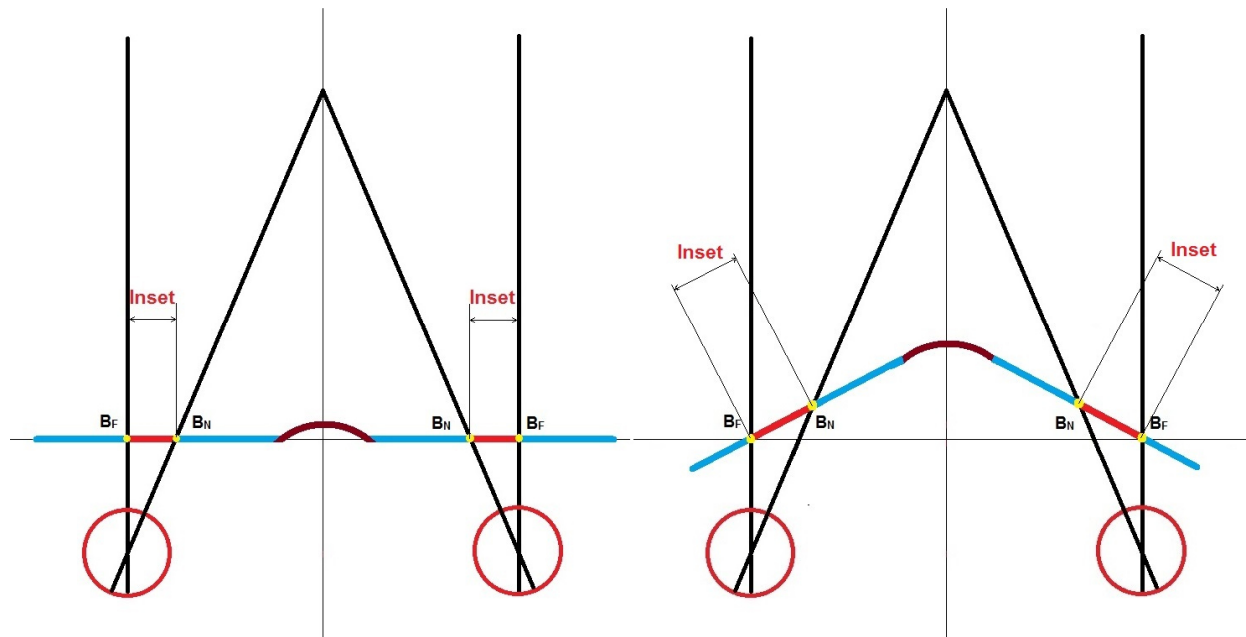


Abbildung 7 Vergleich der Insets bei unterschiedlichem FSW

2.1.6 Akkommodation

Auch die vom Auge selbst aufzubringende Nahakkommodation wirkt sich auf die Konvergenzstellung der Augen aus. Neben der Akommodation werden gleichzeitig unwillkürlich eine Verengung der Pupille und akkommodative Konvergenz durch Innervation der entsprechenden Augenmuskeln ausgelöst. Dies geschieht über den N. oculomotorius über einen übergeordneten neurophysiologischen Regelkreis. Dieser Regelkreis wird auch als Naheinstellungstrias bezeichnet (Dietze, H., Seidel, D. et al. 2008). Das bedeutet, dass bei Nahakkommodation beim Blick auf ein nahe gelegenes Objekt gleichzeitig ein gewisser Anteil akkommodativer Konvergenz ausgelöst wird. Da die Konvergenz mit einer Zunahme der Akkommodation einhergeht, hat diese theoretisch also auch eine Auswirkung auf die Größe des benötigten Insets. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich im Anhang.

Durch die fortschreitende Abnahme des maximalen Akkommodationserfolgs muss der Nahzusatz im presbyopen Lebensalter zunehmend stärker gewählt werden, damit nahe gelegene Objekte in der Hauptnahsehentfernung weiterhin scharf gesehen werden können. Dazu sollte der Nahzusatz für die individuelle Hauptnahsehentfernung so stark wie nötig und zugleich so schwach wie möglich

gewählt werden, um das Akkommodationsgebiet nicht unnötig in seiner Ausdehnung einzuschränken (Diepes, H. 2004). Dies wird in Formel 2.12 zur theoretischen Berechnung der Addition *Add* deutlich.

$$Add = \frac{1}{a_E} - \frac{2}{3} * \Delta A_{max} \quad (2.12)$$

a_E = Hauptnahsehentfernung, positiv einzusetzen [m]

Der Nahzusatz wird demnach so gewählt, dass das Auge zwei Drittel seines noch zur Verfügung stehenden maximalen Akkommodationserfolgs selbst aufbringen muss. Das bedeutet nach der Duanen Kurve, dass ein Jungpresbyoper beim Lesen durch sein Gleitsichtglas mehr Akkommodation aufbringen muss als ein Spätpresbyoper, was beim Jungpresbyopen theoretisch wiederum mehr akkommodative Konvergenz auslöst als beim Spätpresbyopen.

Allerdings verfügen die Retinae der Augen über gewisse Toleranzbereiche, die sogenannten Panum-Areale, innerhalb derer die auf den Netzhäuten entstehenden Bilder noch fusioniert werden können. Dies ist in Abbildung 8 dargestellt.

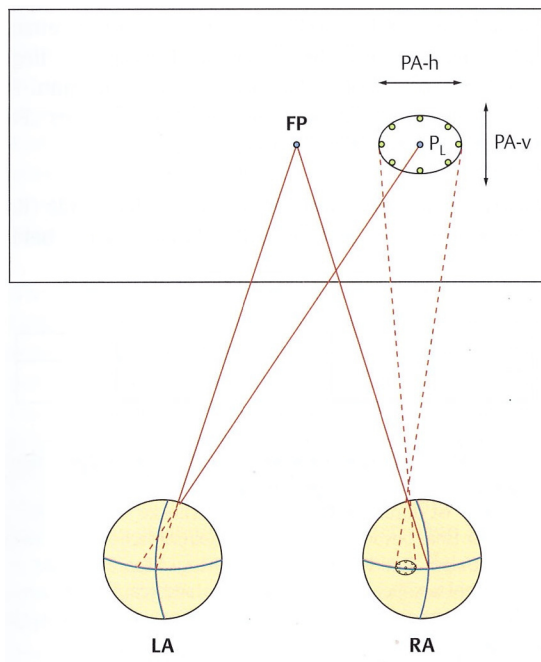


Abbildung 8 Schematische Darstellung des Panum-Areals des rechten Auges für eine korrespondierende Netzhautstelle des linken Auges (Bildquelle: Kaufmann, H. et al. 2012: Strabismus, Georg Thieme Verlag, 4. Auflage, 119)

Die Existenz dieser Panum-Areale erlaubt dem Vergenzsystem kleine Fehleinstellungen, sodass die Kreuzung der Gesichtslinien nicht exakt im Fixierpunkt liegen muss, sondern auch davor oder dahinter erfolgen kann (Fixationsdisparität), ohne dass es zu Störungen des binokularen Einfachsehens kommt (Kaufmann, H. et al. 2012). Dieser „Spielraum“ des visuellen Systems kann der theoretisch schwächeren akkommodativen Konvergenz bei Spätpresbyopen etwas entgegenwirken.

2.2 Versuchsaufbau

Bei der in Kapitel 1.1 bereits angesprochenen Bachelorarbeit von 2015 wurden die Einzelinsets für rechtes und linkes Auge getrennt untersucht (Frost, A., Rippich, N. 2015: Messung des individuellen Insets bei Probanden im Nahbereich, Hochschule Aalen, Studiengang Augenoptik). Dazu wurde ein Gerät verwendet, das mit einer Kamera ausgestattet ist, welche die Augenpartie fotografiert. Hierzu mussten die Probanden in freier Kopf- und Körperhaltung das Gerät selbst in den Händen halten, in vorgegebener Reihenfolge hintereinander neun Fixierpunkte betrachten und beim jeweils fixierten Punkt die Kamera mittels mechanischem Drahtauslöser selbst auslösen. Ziel war es, die individuellen Einzelinsets bei habitueller Kopf- und Körperhaltung zu untersuchen. Allerdings traten bei den Messungen einige unvorhergesehene Schwierigkeiten auf, wodurch die vorliegenden Ergebnisse innerhalb der vier Messreihen ein und desselben Probanden recht große Streuweiten aufzeigten. Eine der zwei Hauptursachen für mögliche Messungenauigkeiten war vermutlich das begrenzte Auflösungsvermögen der verbauten Kamera selbst, wodurch es bei der Auswertung der entstandenen Bilder schwierig war, die exakte Pupillenmitte der Probanden ausfindig zu machen. Die weitere Ursache für Messungenauigkeiten lag darin, dass die Probanden selbst den Drahtauslöser betätigen mussten. Dadurch verwackelte bzw. verkippte das Gerät beim Auslösen der Fotos möglicherweise, wodurch die später ausgewerteten Insets nicht mehr den tatsächlichen Gegebenheiten entsprachen.

Aufgrund der suboptimalen Bildqualität war die Auswertung der Nah-PD verhältnismäßig schwierig. Dies wurde deutlich, nachdem alle vier Bilder des Probanden

1 bei zentraler Blickrichtung von insgesamt drei unterschiedlichen Personen ausgewertet wurden. So erhielt jede auswertende Person verschiedene Pupillendistanzen zu den vier selben Aufnahmen.

Weitere mögliche Fehlerquellen für die aufgetretenen Messungenauigkeiten sind der Bachelorarbeit selbst zu entnehmen.

In dieser vorliegenden Arbeit findet deshalb eine neue Kamera Anwendung, welche über ein höheres Auflösungsvermögen verfügt und mittels elektrischem Fernauslöser durch den Untersuchenden ausgelöst wird, um die oben beschriebenen Schwierigkeiten zu umgehen. Außerdem wird lediglich bei zentraler Blickrichtung gemessen, um zunächst die Plausibilität der gemessenen Werte zu prüfen. Die Messungen erfolgen bei statischer und habitueller Kopfhaltung. Hierzu wird im Vorfeld ein Konzept verschiedener Messmethoden erstellt, welche in den folgenden Kapiteln genauer erläutert werden.

Im Weiteren wird der Begriff *Inset* für die Brillenglasebene verwendet. In der Irisblattebene gibt es eine Fern-PD und eine Nah-PD, deren Differenz als *PD-Inset* bezeichnet wird.

2.2.1 Versuchsaufbau Kameramessungen

Für die direkten Messungen der Nah-PD (Proband blickt direkt in das Objektiv) findet eine neue Kamera der Firma Nikon Verwendung. Dabei handelt es sich um das Modell „Coolpix P7800“ mit einem Auflösungsvermögen von 12,2 Megapixeln, wie es in Abbildung 9 zu sehen ist. Mit dem eingebauten Bildsensor besitzt ein Pixel in der Abbildung eine Auflösung von 0,0364 mm bei einer Messentfernung von 400 mm und einer Brennweite von 22 mm. Die zugehörige Berechnung findet sich im Anhang. Als zusätzliches Ausstattungsmerkmal verfügt die Kamera über ein ausschwenkbares Display, das in beliebigem Winkel neigbar ist. Dies ist bei der Ausrichtung der Kamera und des Probandenkopfes, sowie zur Fixationskontrolle des Probanden sehr hilfreich.



Abbildung 9 Verwendete Kamera - Nikon Coolpix P7800

Zugunsten einer besseren Bildqualität und Erkennbarkeit der Augenpartie und einer damit verbundenen höheren Auswertungsgenauigkeit der Bilder wird bei den Messungen eine permanente LED Ringbeleuchtung der Firma Kaiser benutzt. Diese wird direkt am Kameraobjektiv montiert, sodass die LEDs rotationssymmetrisch zur optischen Achse des Objektivs angeordnet sind. Abbildung 10 zeigt das verwendete Modell „R48“.



Abbildung 10 Verwendete LED Ringbeleuchtung R48 der Firma Kaiser

Die Ringbeleuchtung wird am Kameraobjektiv befestigt, indem ein Adapterring auf das Objektiv aufgeschraubt wird, auf dem schließlich die Beleuchtung selbst durch Aufstecken arretiert. Das Kameraobjektiv besitzt ein Außengewinde, das bedeutet, der Adapterring zur Montage der Beleuchtung muss über ein Innengewinde verfügen. Da die mitgelieferten Adapterringe ausschließlich mit Außengewinden versehen sind, wird ein neuer Adapterring des Gesamtdurchmessers 84 mm und zentralem metrischen Feingewinde des Maßes M57x0,75 aus Aluminium gefertigt, auf dem die Ringbeleuchtung arretiert. Abbildung 11 verdeutlicht diese anfängliche Problematik.

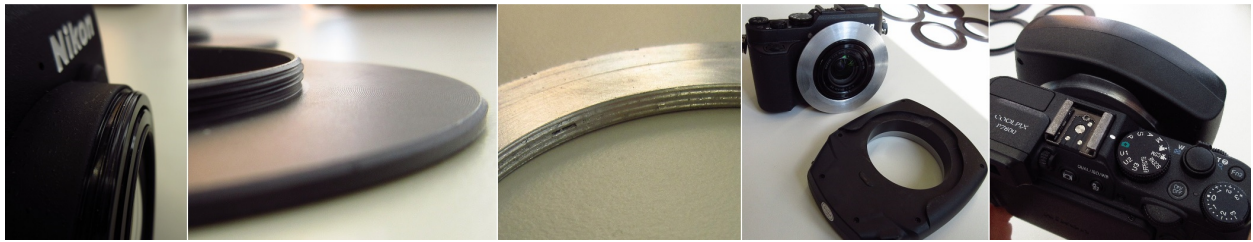


Abbildung 11 Montage der Ringbeleuchtung an der Kamera. Beschreibung v.l.n.r.: Außengewinde des Kameraobjektivs, Außengewinde eines mitgelieferten Adapterrings, Innengewinde des angefertigten Adapterrings, Kamera mit aufgeschraubtem Adapterring, fertig montierte Ringbeleuchtung

Um Messungenauigkeiten vorzubeugen, wird zur erschütterungsfreien Auslösung der Fotos ein elektrischer Fernauslöser der Firma Hama verwendet, welcher durch den Untersucher betätigt wird. Dabei handelt es sich um das Modell „NI-3-1.1“. Abbildung 12 zeigt den verwendeten Fernauslöser.



Abbildung 12 Verwendeter Fernauslöser - Hama NI-3-1.1

Für die ersten Testfotografien zur Entscheidung technischer Umsetzungen wird die Kamera vorläufig auf ein Saugnapf-Stativ mit Kugelkopf der Firma Cullmann West-Germany montiert. Jenes kann in beliebigem Winkel geneigt werden, um die Kamera vorerst auf die Blickrichtung zu justieren. In Abbildung 13 ist das Stativ selbst, sowie der vorläufige Versuchsaufbau dargestellt.



Abbildung 13 Für erste Tests verwendetes Saugnapf-Stativ der Firma Cullmann West-Germany (linke zwei) und vorläufiger Versuchsaufbau (rechte zwei)

Da die Messungen bei zentraler Blickrichtung erfolgen sollen, ist zu überlegen, welche Art Fixationsvorrichtung verwendet werden soll, wo sie positioniert und wie sie an der Kamera befestigt wird. Dabei stehen zwei Arten an Fixationsvorrichtungen zur engeren Auswahl. Die erste besteht im Prinzip aus einer Plexiglasscheibe, auf die mit weißem Lack ein Punkt von 2 mm Durchmesser als Fixationsmarke aufgebracht wird. Diese wird mit doppelseitigem Klebeband an zwei Punkten vor das Kameraobjektiv auf die Ringbeleuchtung geklebt, sodass sich der weiße Punkt exakt in der Mitte der Blendenöffnung des Objektivs befindet. Diese Art hat den Nachteil, dass bei aufgeklebter Plexiglasscheibe mit der Kamera nicht gezoomt werden kann. Die zweite Variante besteht im Prinzip aus einem Fadenkreuz, welches am Objektiv selbst befestigt wird, in dessen Mitte sich ein weißer Punkt zur Fixation befindet. Der Vorteil dieser Art besteht zunächst darin, dass mit der Kamera gezoomt werden kann, da das Objektiv nicht in seiner Bewegungsfreiheit nach vorne eingeschränkt ist. Zur Umsetzung dieser zweiten Fixationsvorrichtung wird ein Holzring des Innendurchmessers des Objektivs gefertigt (40 mm), in den exakt zentrisch zwei Drähte eingespannt werden (Abbildung 14). Im Kreuzungspunkt der Drähte wird eine Messinghülse mit eingefasstem Rinderknochen des Durchmessers 2 mm eingeschlaucht, welche als Fixationsmarke dient. Dies muss sehr präzise erfolgen, damit sich die Fixationsmarke genau in der Mitte vor der Blendenöffnung des Objektivs befindet. Diese ringförmige Fixationsvorrichtung wird anschließend vorne auf das Objektiv gesteckt. Beide Fixationsmarken befinden sich unmittelbar vor der Objektivlinse, sodass sie auf den späteren Fotos komplett im Unschärfebereich verschwinden.

Nun werden beide Arten im direkten Vergleich auf ihre Beeinflussung der Bildqualität geprüft, indem mit jeder Vorrichtung jeweils ein Foto ausgelöst wird und anschließend die Güte der Bildqualitäten miteinander verglichen wird. In Abbildung 14 sind auf der linken Seite von oben nach unten die Plexiglasscheibe als Fixationsvorrichtung, die Befestigung an der Kamera und die Auswirkung auf die Bildqualität dargestellt. Auf der rechten Seite sind ebenfalls von oben nach unten der Ring mit Fadenkreuz als Fixationsvorrichtung, seine Befestigung an der Kamera und seine Auswirkung auf die Bildqualität dargestellt.

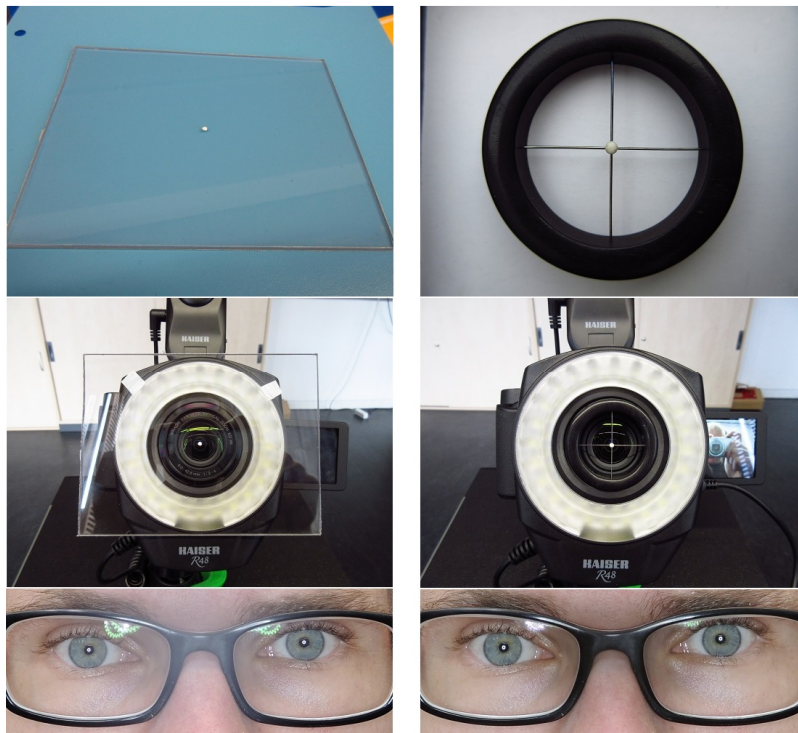


Abbildung 14 Links v. oben n. unten: Plexiglasscheibe als Fixationsvorrichtung, Montage an Kamera, resultierende Bildqualität. Rechts v. oben n. unten: Fadenkreuz als Fixationsvorrichtung, Montage an der Kamera, resultierende Bildqualität

Beim direkten Vergleich der Bildqualitäten ist auf dem Foto durch die Plexiglasscheibe eine Kontrastminderung zu erkennen, wodurch der Kontrast im Pupillenbereich leicht beeinflusst ist. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass auch das Zoomen mit der Plexiglasvorrichtung nicht möglich ist, findet in den folgenden Messungen der Holzring mit Fadenkreuz als Fixationsvorrichtung Anwendung.

Ferner werden Überlegungen zur Erkennbarkeit der Fixationsmarke angestellt, da die Ringbeleuchtung, innerhalb welcher sich die Marke befindet, recht hell ist und somit gegebenenfalls eine Blendung der Probanden hervorruft. Daher wird nach einer Lösung gesucht, womit die Augenpartie dennoch gut ausgeleuchtet ist, der Proband gleichzeitig aber nicht geblendet wird. Hierzu werden eine Art Gelb- und Blaufilter aus einem Kunststoffregister auf den Innen- und Außerdurchmesser der belichteten Fläche der Ringbeleuchtung zugeschnitten. Zur Befestigung der Filter auf der Beleuchtung wird die Adhäsionswirkung eines Wassertropfens genutzt. In Abbildung 15 sind die Erkennung der Fixationsmarke mit aus- und eingeschalteter Beleuchtung, sowie die zugehörigen Bildqualitäten für gelben, blauen und keinen Filter spaltenweise von oben nach unten dargestellt.

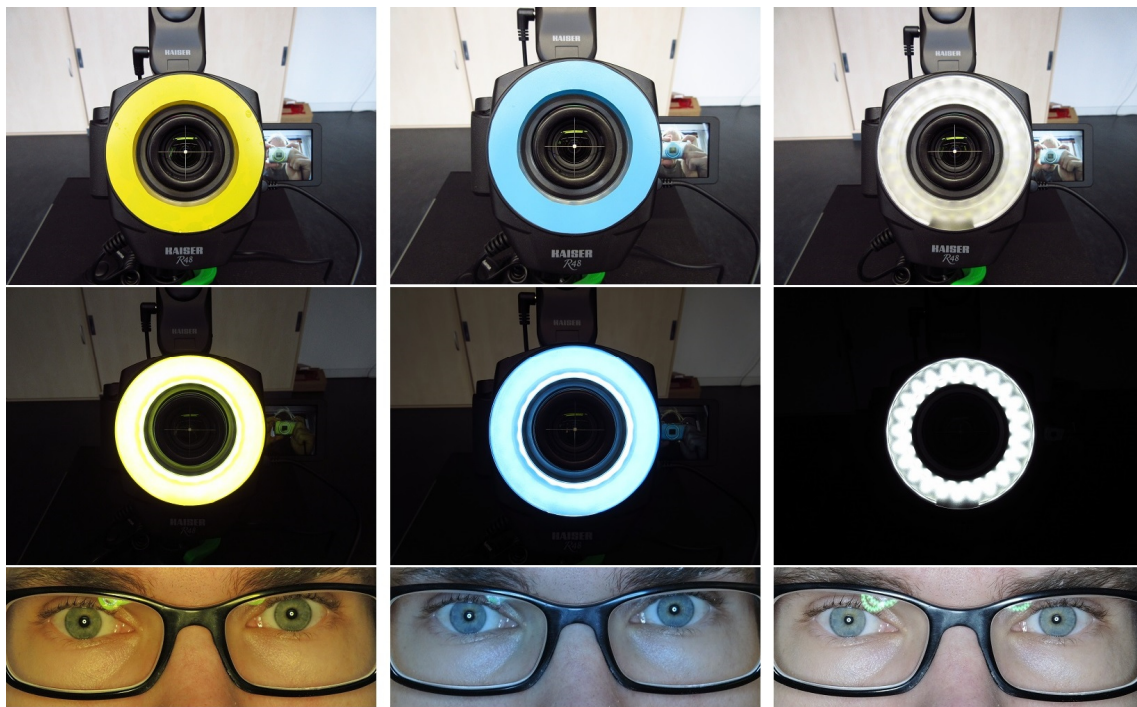


Abbildung 15 Vergleich von Erkennung der Fixiermarke ohne Blendung (oben), Erkennung der Fixiermarke mit Blendung (Mitte) und Erkennbarkeit der Pupillen (unten) für Gelbfilter (links), Blaufilter (Mitte) und ohne Filter (rechts)

Beim Vergleich der in der mittleren Zeile angeordneten Bilder in Abbildung 15 wird deutlich, dass die Erkennbarkeit der Fixationsmarke auf dem rechten Bild ohne Filter recht schwierig ist. Allerdings werden diese Aufnahmen mit einer Digitalkamera gemacht (Canon Ixus 265 HS), welche die ISO-Empfindlichkeit, den

Blendendurchmesser und die Verschlusszeit automatisch den gegebenen Lichtverhältnissen anpasst. Diese vollautomatische Anpassung entspricht jedoch zum einen nicht der tatsächlichen Blendungsempfindlichkeit des Auges und zum anderen adaptiert das Auge auf verschiedene Leuchtdichteniveaus. Daher werden alle Probanden während der Entscheidungsphase, ob mit oder ohne Filter gemessen werden soll, eine Minute lang bei eingeschalteter Beleuchtung vor die Kamera gesetzt, sodass die Helladaptation der Augen einsetzt. Bei der anschließenden Befragung hat keiner der Probanden Schwierigkeiten bei der Erkennung der Fixationsmarke bei Beleuchtung ohne Filter. Dies liegt sicherlich auch an dem Probandenalter, welches sich zwischen 23 und 25 Jahren bewegt. In dieser Altersgruppe sind die brechenden Medien der Augen üblicherweise noch verhältnismäßig klar. Daher wird sich für die nachfolgenden Messungen gegen die Verwendung eines Filters entschieden, da die Erkennbarkeit der Pupillen auf den späteren Fotos besser ist und jene dadurch präziser ausgewertet werden können. Bei der Messung von Personen fortgeschritteneren Alters sollte allerdings aufgrund potenzieller Medientrübungen über die Verwendung eines Filters oder idealerweise eines Ringblitzes nachgedacht werden.

Für die Messungen wird ein Hubtisch mit exakt mittig angebrachter Kinn- und Stirnstütze (KSS) präpariert. Hierzu wird auf dem Hubtisch mittig vor der KSS die Führungsschiene einer optischen Bank im rechten Winkel montiert. Die exakte Mitte der Führungsschiene wird mit einem wasserfesten Stift über die gesamte Länge markiert. Zusätzlich wird ein Verschiebereiter auf die Schiene gesetzt, welcher der Kamera als Träger dient. Die Kamera muss zentral mittig und ohne seitliche Verdrehung vor der KSS positioniert werden. Dies muss sehr präzise erfolgen. Um die Kamera auf dem Verschiebereiter zu befestigen, wird ein Adapterstück angefertigt, welches auf jenem montiert wird. Das Adapterstück besteht im Wesentlichen aus zwei rechteckigen Aluminiumplatten, welche mit zwei Schrauben verbunden eine Art Scharnier bilden. Das fertige Adapterstück zeigt Abbildung 16.

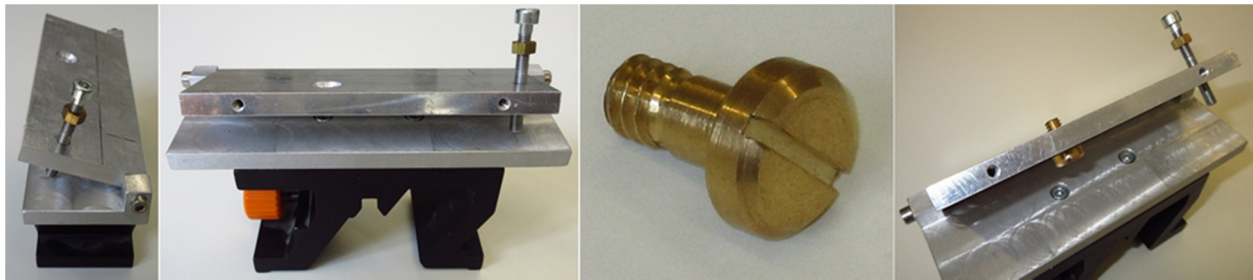


Abbildung 16 Fertiggestelltes Adapterstück zur Montage auf dem Verschiebereiter. Ansicht von der Seite (links), Ansicht von vorne (zweite v. links), 1/4-Zoll-Schraube (zweite v. rechts) und Schraubenpositionen in der Aluminiumplatte (rechts)

Dazu wird eine 17 mm starke erste Platte des Kantenmaßes 14,8 x 4,8 mm mit einer Fräsbank auf 7 mm Stärke heruntergefräst. Dabei wird an zwei Ecken einer Längsseite auf jeweils einer Fläche von 10 x 10 mm Material stehen gelassen. Diese Überstände werden parallel zur Längskante durchbohrt, wodurch sie als Aufnahme des Scharniers dienen. Diese Platte wird später mit zwei Schrauben (M3x0,75) mittig auf dem Verschiebereiter parallel zu dessen Kanten befestigt. Eine zweite 8 mm starke Aluminiumplatte des Kantenmaßes 12,8 x 5,2 mm wird parallel zur Längskante zwischen die Aufnahmestücke der ersten Platte eingesetzt und in Verlängerung der vorhandenen Löcher an den Stirnseiten gebohrt. Hier werden innenseitig zusätzlich metrische Feingewinde der Maße M3x0,75 eingeschnitten. Die Platten werden miteinander verschraubt und bilden zusammen eine Art Scharnier. Um die Neigung der beiden Platten und später der Kamera mittels Anschlagschraube präzise justieren zu können, wird in die obere Platte ein weiteres Loch gebohrt und mit einem Gewinde des Maßes M4x0,75 versehen. Hier wird die Anschlagschraube eingedreht.

Damit die Mitte der Führungsschiene mit der optischen Achse des Kameraobjektivs in einer Flucht liegt, muss dies vor der Bohrung des Lochs zur Aufnahme der Kamera akkurat vermessen werden. Dazu wird der Verschiebereiter mit Aluminiumstück auf die Führungsschiene gesetzt und die Kamera unter Zuhilfenahme zweier Winkel exakt ausgerichtet, sodass sie parallel zur Vorderkante der Aluminiumplatte steht und die optische Achse des Objektivs und die Mittellinie der Führungsschiene bei parallaxefreiem Blick von oben exakt miteindander fluchten.

Alle relevanten Strecken für die perfekte Position der Kamera werden auf der Platte angrissen.

Anschließend werden die Maße in x- und y-Richtung bis zur Mitte der Gewindebohrung an der Kameraunterseite genommen, welche zur Ermittlung der exakten Bohrung auf der Aluminiumplatte von den angerissenen Markierungen abgetragen werden. An dieser Stelle wird ein Loch mit 6,5 mm Durchmesser gebohrt. Zur endgültigen Befestigung der Kamera auf der oberen Platte des Adapterstücks wird eine 1/4-Zoll-Schraube gefertigt, mit der die Kamera von unten an der Platte festgeschraubt wird. Diese Justierung zeigt Abbildung 17.



Abbildung 17 Ausrichtung der Kamera zur Mittellinie der Führungsschiene

Durch den Scharniercharakter des Adapterstücks besitzt die Kamera in ihrer Beweglichkeit nur einen Freiheitsgrad, wodurch sie lediglich nach oben oder unten gekippt werden kann. Hinsichtlich des Ziels der Messungen, nur bei zentraler Fixation zu messen, ist diese Eigenschaft ideal, da die Kamera weder durch einen seitlichen Versatz noch durch seitliche Verdrehung dezentriert werden kann.

2.2.2 Messaufsatz

Für die weiteren Messungen wird ein spezieller Messaufsatz benutzt. Dieser wird zur Kontrolle einer geraden, nicht seitenversetzten Kopfhaltung möglichst mittig auf die Brillenfassung gesetzt. Dieser verfügt über einen Dorn mit einem aufgezichneten Kreuz und einer dahinterliegenden Skala, mithilfe derer eine potenzielle Kopfdrehung oder ein seitlicher Versatz bei den Messungen detektiert

werden können. Die Länge des Dorns beträgt 33 mm, der Linienabstand auf der Skala beträgt 3 mm. Die genaue Berechnung des Kopfdrehungswinkels und dessen Verrechnung auf den gemessenen Inset werden in Kapitel 2.3.2 ausführlich erklärt. Zum Verständnis der nachfolgenden Beschreibungen der Versuchsaufbauten ist an dieser Stelle vorerst das grundsätzliche Funktionsprinzip dieses Aufsatzes relevant.

In Abbildung 18 sind die Maße des Aufsatzes zu erkennen; ferner wird sein Prinzip etwas deutlicher. Befindet sich der Kopf in gerader Position, liegen die vertikale Linie des Kreuzes und die vertikale Mittellinie der dahinterliegenden Skala in einer Flucht (links). Bei einer Kopfdrehung fluchten diese vertikalen Linien nicht mehr, sodass diese seitlich versetzt sind (rechts).

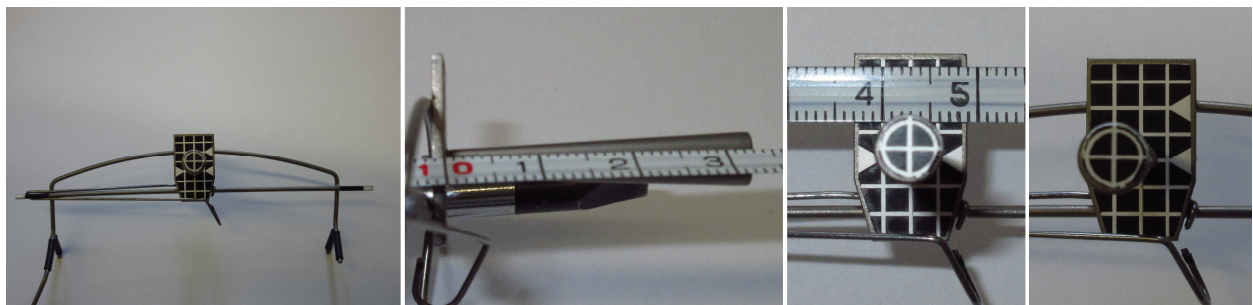


Abbildung 18 Messaufsatz bei zentrischem Ausblick (links), Länge des Dorns (zweite v. Links), Maßstab der Skala (zweite v. rechts) und Ausblick bei Kopfdrehung oder seitlichem Versatz (rechts)

2.2.3 Probanden

Die Messungen werden an insgesamt drei weiblichen Probanden durchgeführt. Das Probandenalter liegt zwischen 23 und 25 Jahren. Alle Messungen sind unter Vollkorrektur in der Ferne mittels Kontaktlinsen durchgeführt. Dadurch werden keine Brillengläser mit dioptrischer Wirkung benötigt, welche durch induzierte prismatische Wirkungen beim Blick in die Nähe das Konvergenzverhalten der Probanden beeinflussen würden. Außerdem werden alle drei Probanden durch die Vollkorrektur durch Kontaktlinsen in eine künstliche Emmetropie versetzt, wodurch alle drei bei gleichem aufgebrachtem Akkommodationsaufwand nahezu den gleichen Akkommodationserfolg erzielen sollten. Dadurch sollte gemäß des

in Kapitel 2.1.6 beschriebenen Naheinstellungstrias‘ bei allen Probanden theoretisch ein gleiches Maß an akkommodativer Konvergenz ausgelöst werden. Zusätzlich wird bei allen Messreihen ein Kunstkopf vermessen. Dieser bietet ein statisches System und dient zusätzlichen Kontrollmessungen, um die absolute Genauigkeit der Messungen und Auswertungen des Untersuchers zu prüfen. Kunstkopf und Probanden erhalten jeweils eine Brillenfassung, die zu Beginn anatomisch angepasst und vermessen wird. Die folgenden Messungen werden alle einheitlich nach Pupillenmitte durchgeführt und ausgewertet. Die Messentfernung beträgt bei allen folgenden Nah-Messungen 400 mm zwischen Fixationsmarke und rechtem bzw. linkem Hornhautscheitel.

2.2.4 Fassungen

Für die Versuche werden Metallfassungen verwendet, da diese den jeweiligen Probanden bestmöglich an die anatomischen Gegebenheiten angepasst werden können. In Abbildung 19 sind die Fassungen in der entsprechenden Reihenfolge für Proband 1-3 von oben nach unten angeordnet. Die untere Fassung dient den Messungen am Kunstkopf.



Abbildung 19 Brillenfassungen von oben nach unten zugehörig zu Proband 1-3. Untere Fassung dient den Messungen am Kunstkopf

Auch bei den späteren Kameraaufnahmen ist eine möglichst gute Bildqualität der Augenpartie von großer Bedeutung, um auf den Fotos die Pupillenmitte so exakt wie möglich bestimmen zu können. Da die vorhandenen Demoscheiben oftmals verkratzt sind und eine starke Lichtreflexion besitzen, werden diese entfernt und stattdessen superentspiegelte Plangläser (Kunststoff, $n=1,5$) eingearbeitet. In Abbildung 20 lässt sich der Unterschied der Bildqualität mit Demoscheiben und superentspiegelten Plangläsern erkennen. Die Augenpartie mit Demoscheiben erscheint dunkler, mit Plangläsern hingegen heller, wodurch die Pupille besser von der Iris abzugrenzen ist. Da Plangläser eine optische Dicke besitzen, entsteht bei schrägem Durchblick ein optischer Versatz von binokular etwa 0,1 mm. Die Berechnung dazu findet sich im Anhang. Dieser Versatz ist in dieser Arbeit allerdings nicht berücksichtigt.



Abbildung 20 Vergleich der Bildqualität der Augenpartie mit Demoscheiben (links) und superentspiegelten Plangläsern (rechts)

Nachdem die Fassungen verglast sind, werden sie zunächst werkstattgerecht ausgerichtet. Bei der anatomischen Brillenanpassung werden die Nasenauflagen so angepasst, dass die Brille in ihrer Höhe ideal vor den Augen sitzt und die Abstände des rechten und linken Fassungsrandes zum Nasenrücken gleich groß sind. Dies ist besonders wichtig in Hinblick auf die Ausmessung der später angezeichneten PD. Jene wird monokular immer von der Stegmitte der Fassung aus gemessen. Sitzt die Fassung von vornherein mit seitlichem Versatz vor den Augen, entspricht auch die auf der Fassung angezeichnete und anschließend ausgemessene monokulare PD nicht den tatsächlichen Umständen. Diese und weitere Problematiken werden in Kapitel 2.3.2 nochmals genauer betrachtet.

2.2.5 Messung von VN, HSA und FSW

Anschließend werden bei allen Probanden einschließlich Kunstkopf verschiedene Parameter gemessen. Das sind zunächst die Vorneigung, der Fassungsscheibenwinkel und der HSA.

Die Vorneigung wird am stehenden Probanden mit aufgesetzter Brillenfassung in habitueller Kopf- und Körperhaltung mit dem Messinstrument der Firma Zeiss gemessen (Abbildung 21). Es wird mit der Kante so auf dem vorderen Brillenglasscheitel angelegt, dass beim Blick von der Seite der Abstand zwischen oberem und unterem Fassungsrand zu der Kante des Messgeräts gleich groß ist.

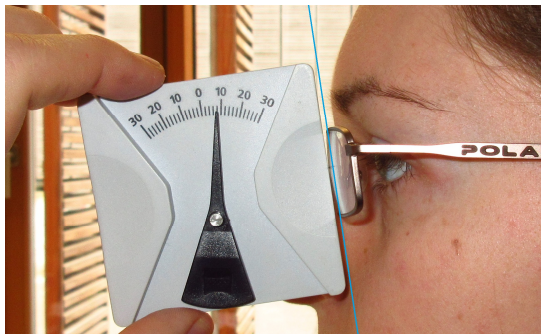


Abbildung 21 Messung der Vorneigung mittels Zeiss Messinstrument

Die Kante des Vorneigungsmessers muss also parallel zu der gedachten Verbindungsgeraden zwischen oberem und unterem Fassungsrand liegen. Dabei ist darauf zu achten, dass sich das Pendelgewicht unten befindet und die Nadel nach oben zeigt. Der entsprechende Vorneigungswinkel wird von der Gradskala abgelesen und notiert.

Der HSA ist die Strecke zwischen bildseitigem Brillenglasscheitel und Hornhautscheitel. Diese Strecke wird entsprechend vom Lineal abgelesen. Da das Brillenglas eine gewisse Durchbiegung besitzt, ist der hintere Brillenglasscheitel im Profil nicht zu sehen (Abbildung 22). Somit wird der hintere Scheitelpunkt im Profil des Glases abgeschätzt. Ferner muss darauf geachtet werden, dass der Blick exakt auf Höhe des HH-Apex über die Skala des Lineals verläuft, da sich andernfalls eine auftretende Bewegungsparallaxe - bedingt durch den Abstand zwischen HH und Lineal - auf den abgelesenen Wert auswirkt.

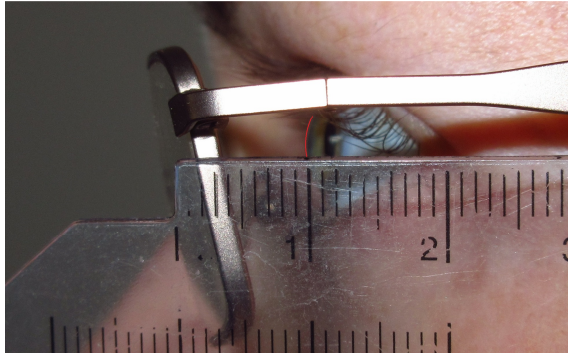


Abbildung 22 Messung des HSA

Der FSW wird mithilfe eines speziellen Messinstruments der Firma Rodenstock gemessen. Als Messpunkte dienen die vier Glaskanten der Brillenglasrückflächen. In Abbildung 23 beträgt der FSW beispielsweise 7°.

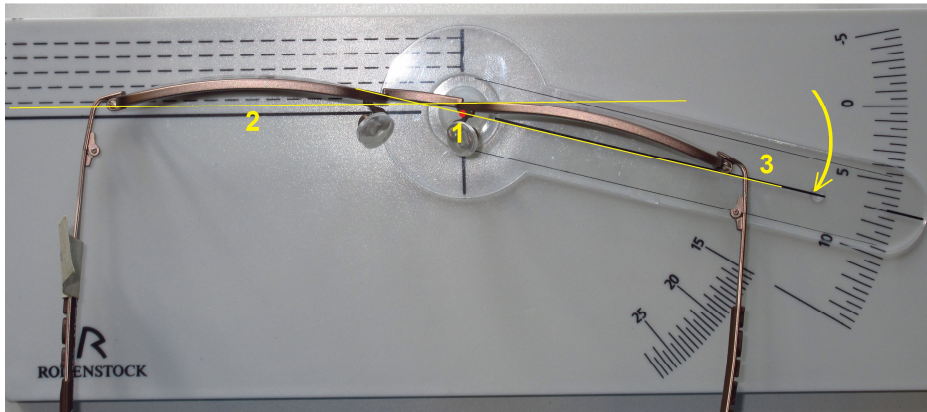


Abbildung 23 Messung des FSW mittels Rodenstock Messinstrument in drei Schritten

2.2.6 Bestimmung des Führungsauges

Bei allen drei Probanden wird zusätzlich das Führungsauge sowohl motorisch als auch sensorisch bestimmt.

Zunächst wird das Führungsauge motorisch bestimmt. Hierzu fixiert der jeweilige Proband ein fernes Objekt und hält anschließend mit ausgestreckten Armen eine Art Passepartout mit einem 4 cm großen, runden Loch in sein Blickfeld. Dabei hat er das Objekt stets zu fixieren. Dann führt er das Passepartout bei stetiger Fixierung des Objekts langsam in Richtung seiner Augen. Das Auge, das zuletzt durch das Loch hindurchblickt, ist das motorische Führungsauge.

Zur Bestimmung des sensorischen Führungsauges fixiert der Proband nochmals ein fernes Objekt. Anschließend wird ein Messglas der Stärke +1,00 dpt erst vor das rechte Auge gehalten, danach vor das linke Auge. Das Auge, vor dem das Plusglas den binokularen Seheindruck intensiver stört, ist das sensorische Führungsauges.

2.2.7 Messung der Fern-PD

Pupillometer

Die Fern-PD wird zunächst mittels Pupillometer der Firma „Towa Medical Instruments“ gemessen. Dies muss sehr sorgfältig durchgeführt werden, da jene später als Ausgangswert zur Berechnung des Insets dient. Das hierfür verwendete Gerät zeigt Abbildung 24. Diese Messung wird zehn Mal wiederholt, und die Werte werden arithmetisch gemittelt.



Abbildung 24 Verwendetes Pupillometer zur Messung der Fern-PD der Firma Towa Medical Instruments

Die gemittelten monokularen Pupillendistanzen (Ferne) werden anschließend auf einer Zentrierschablone akkurat auf die Brille übertragen (Abbildung 25). Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Stegmitte der Brillenfassung exakt auf der vertikalen Mittellinie der Schablone liegt.

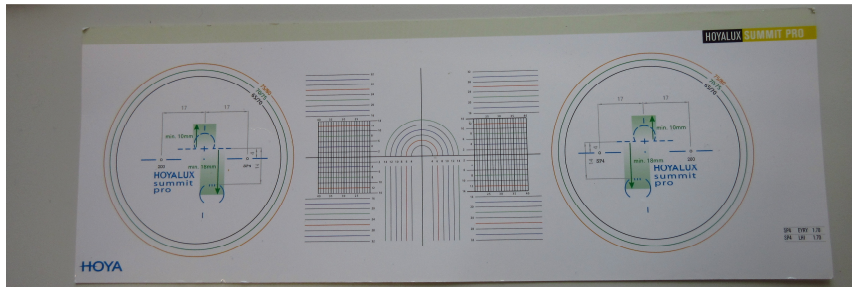


Abbildung 25 Zentrierschablone der Firma Hoya mit Millimeterskalierung

Viktorin-Methode

Die angezeichnete PD wird folgend nach der Viktorin-Methode kontrolliert. Bei dieser Messung wird das Partnerauge nicht abgedeckt, sodass der Proband stets binokular das jeweilige Auge des Untersuchers fixiert. Dabei müssen sich Untersucher und Proband exakt, ohne seitlichen Versatz gegenüberstehen, da andernfalls Parallaxenfehler entstehen. Darauf wird in Kapitel 2.3.2 nochmals genauer eingegangen. Der Untersucher kontrolliert jeweils im Wechsel die Anzeichnung auf dem Brillenglas des ihm gegenüberliegenden Auges des Probanden. Die vertikalen Linien auf den Gläsern müssen genau mit den Pupillenmitten der Probanden übereinstimmen. Ist dies nicht der Fall, muss die Anzeichnung entsprechend nachgebessert werden. Die nach Viktorin abgeglichene PD wird anschließend ausgemessen und notiert.

Da die angezeichnete Fern-PD unter Umständen noch einmal gebraucht wird, empfiehlt es sich, jene auf den Brillengläsern rückseitig ordentlich anzuzeichnen, wie in Abbildung 26 zu sehen ist.

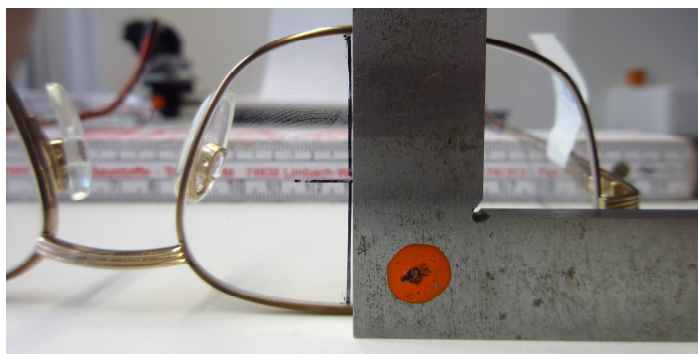


Abbildung 26 Endgültig angezeichnete Fern-PD. Die Anzeichnung befindet sich im Lot

2.2.8 Messung der Nah-PD

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Methoden zur Messung der Nah-PD. Diese werden im Folgenden genauer erläutert.

Tabelle 1 Übersicht über die verschiedenen Methoden zur Messung der Nah-PD

Messung der Nah-PD	
Messmethode	Beschreibung
Pupillometer	Mittels Pupillometer bei einer Einstellung auf 0.40 m (Proband 1 bis 4)
Spiegelmethode	Proband fixiert die Fixationsmarke auf dem Spiegel, Direkte Anzeichnung der Brillengläser durch den Untersucher, über Kreuz (Proband 1 bis 4)
Spiegelmethode mittels Kamera	<i>Statisch</i> mittels KSS, Proband fixiert die Fixationsmarke auf dem Spiegel, Untersucher erstellt zehn Fotos (Proband 1 bis 4)
	<i>Habituell</i> ohne KSS, Proband fixiert die Fixationsmarke auf dem Spiegel, Untersucher erstellt zehn Fotos (Proband 1 bis 4)
Direkte Kameramessung	<i>Statisch</i> mittels KSS, Proband fixiert Fixationsmarke vor Objektiv, Erstellung von zehn Fotos, <i>unveränderte VN</i> (Proband 1 bis 4)
	<i>Statisch</i> mittels KSS, Proband fixiert Fixationsmarke vor Objektiv, Erstellung von zehn Fotos, <i>Inklinations- $\Delta 10^\circ$</i> (Proband 1 bis 3)
Direkte Kameramessung mit Landoltring	Statisch mittels KSS, Proband fixiert Landoltring vor Objektiv, Erstellung von zehn Fotos, <i>unveränderte VN</i> (Proband 3)

Pupillometer

Die Nah-PD wird zunächst mit demselben Pupillometer gemessen, mit dem bereits die Fern-PD gemessen wurde. Vor Beginn der Messung wird das Einstellrad auf 40 cm gestellt. Die Gesamt-PD für die Nähe ergibt sich aus der Summe der monokularen Pupillendistanzen. Auch hier erfolgen zehn Messungen, deren Werte arithmetisch gemittelt werden.

Spiegelmethode

Als Vergleichswert wird die Nah-PD auf klassische Weise nach der Spiegelmethode gemessen. Hierzu wird auf einen Spiegel ein kleiner heller Punkt gezeichnet, welcher dem Probanden als Fixationsmarke dient.

Als zusätzliche Hilfe bei der Ausrichtung des Kopfes empfiehlt es sich, eine Gerade als Hilfslinie durch die Fixationsmarke zu zeichnen (Abbildung 27).

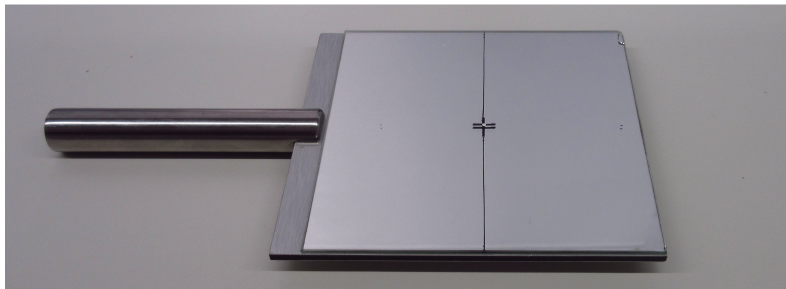


Abbildung 27 Spiegel mit zentral aufgezeichneter Fixationsmarke

Wird diese Methode richtig durchgeführt, wird theoretisch die tatsächliche Nah-PD auf Brillenglasebene erhalten. Hierzu sitzen sich Untersucher und Proband an einem geeigneten Tisch gegenüber. Zwischen die Personen wird der präparierte Spiegel flach auf den Tisch gelegt. Der Proband trägt seine Brillenfassung mit darauf befestigtem Messaufsatz. Der Abstand zwischen Hornhautscheitel und Fixationsmarke beträgt für beide Personen 400 mm. Streng genommen müsste der Beobachtungsabstand des Untersuchers zum Spiegel vorher anhand der Pupillendistanzen von Untersucher und Proband exakt berechnet werden. Dies wurde bei diesen Untersuchungen allerdings nicht praktiziert. Zur Kontrolle einer unverdrehten Kopfhaltung des Probanden orientiert sich der Untersucher an dem Messaufsatz auf der Brille. Für die richtige seitliche Ausrichtung der Köpfe orientiert sich der Untersucher an der aufgezeichneten Hilfslinie. Er blickt mit beiden Augen über den Spiegel auf den Nasenrücken des Probanden. Dabei sollte das aufgezeichnete Fixationskreuz der Spiegelebene mittig auf dem Nasenrücken des Probanden zu sehen sein. Zur Feinjustierung bietet es sich an, sich zwei „symmetrische“ Anhaltspunkte im Gesicht des Probanden zu suchen. Solche sind beispielsweise die Mundwinkel. Der Untersucher blickt mit dem rechten und linken Auge abwechselnd über den Spiegel auf den über Kreuz gegenüberliegenden

Mundwinkel. Ist die seitliche Ausrichtung des Kopfes ideal, liegt die Hilfslinie stets auf dem über Kreuz gegenüberliegenden Mundwinkel des Probanden. Sitzen sich Untersucher und Proband in der korrekten Position vor dem Spiegel gegenüber, fixiert der Proband mit beiden Augen die Fixationsmarke in der Spiegelebene. Der Untersucher blickt mit seinem rechten Auge über den Spiegel über Kreuz auf das rechte Auge des Probanden und merkt sich die Position der Pupille gegenüber der Anzeichnung der Fern-PD auf dem Brillenglas. Dies wird nun mit dem linken Auge wiederholt. Um sich die Position beider Pupillen besser zu merken, ist es hilfreich, beschriebenen Vorgang mit rechtem und linkem Auge mehrmals im Wechsel hintereinander zu wiederholen. Anschließend werden diese Positionen auf den Brillengläsern angezeichnet, dem Probanden die Brille wieder aufgesetzt, die Köpfe erneut ausgerichtet und der Ablauf wiederholt. Dabei wird kontrolliert, ob die angezeichneten Markierungen mit den Pupillenmitten des Probanden übereinanderliegen. Ist dies nicht der Fall, wird die entsprechende Markierung in die richtige Richtung korrigiert und der Ablauf erneut wiederholt, solange, bis Anzeichnungen und Lage der Pupillenmitten exakt übereinstimmen. Wird der gesamte Justieraufwand betrachtet, wird ersichtlich, dass sich zwischen jedem Auf- und Absetzen der Brille Fehler in die Messung einschleichen können.

Wie bereits erwähnt, lässt sich mit dieser Methode theoretisch die Nah-PD auf Brillenglasebene ermitteln. Dazu müssen jedoch ein paar Dinge beachtet werden. Der Beobachtungsabstand des Untersuchers müsste genau genommen vor Beginn der Messung exakt berechnet werden. Sind die Pupillendistanzen von Proband *und* Untersucher für die Ferne gleich, müssen beide im exakt gleichen Abstand zu der Fixationsmarke sitzen. So liegen die Verlängerungen der Fixierlinien von Untersucher und Proband quasi übereinander. Dies ist in Abbildung 28 schematisch dargestellt.

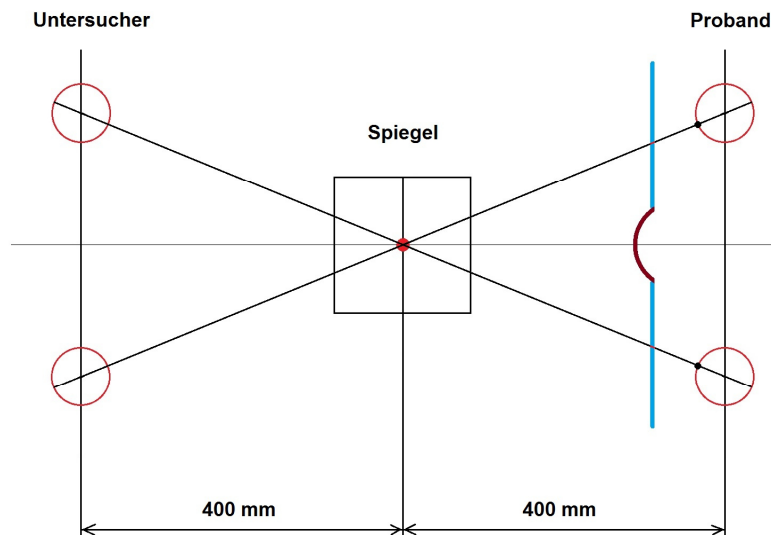


Abbildung 28 Schematische Darstellung der Messung der Nah-PD bei korrekt durchgeführter Spiegelmethode

Misst der Untersucher die Einstellentfernung des Probanden akkurat aus, hält jene aber selbst nicht ein, liegen die Fixierlinien von Untersucher und Proband nicht mehr übereinander. Der Untersucher sieht die Pupille des Probanden hinter einer Stelle im Brillenglas, welche nicht dem Durchblickspunkt des Probanden entspricht. Dies wird in Abbildung 29 ersichtlich.

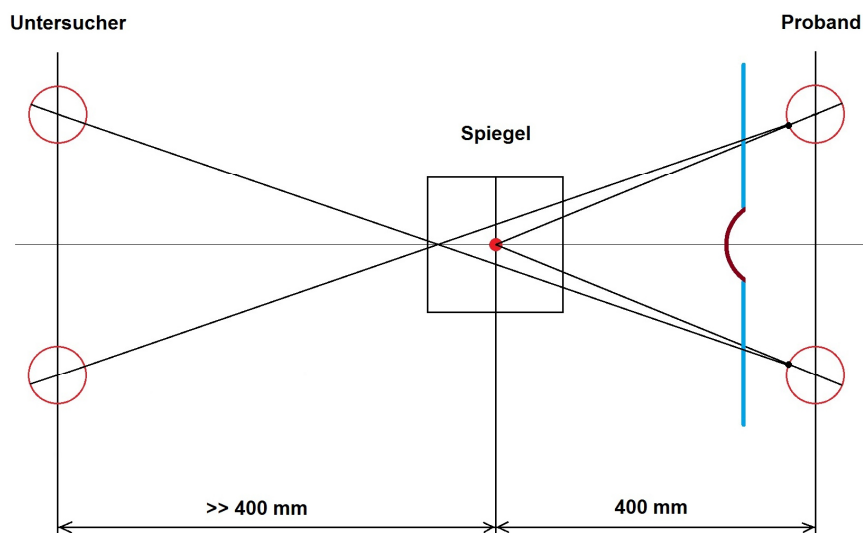


Abbildung 29 Fehlerhafte Durchführung der Spiegelmethode. Der Untersucher befindet sich nicht in gleichem Abstand zur Fixationsmarke wie der Proband

Desweiteren müssen die Mittellinien beider Köpfe in einer Flucht liegen. Das bedeutet, zwischen den Köpfen darf kein seitlicher Versatz bestehen, keiner der Köpfe darf um einen gewissen Kopfdrehungswinkel seitlich gedreht sein und es muss immer binokular über Kreuz gemessen werden. Abbildung 30 zeigt die Auswirkung auf die angezeichnete Nah-PD, falls die Spiegelmethode seitens des Untersuchers monokular durchgeführt wird. Auch hier sieht der Untersucher stets die Pupille des Probanden, nicht aber dessen eigentlichen Durchblickspunkt in der Brillenglasebene selbst. Bei der Anzeichnung der vom Untersucher gesehenen Nah-PD auf den Brillengläsern ergibt sich somit ein falscher Wert.

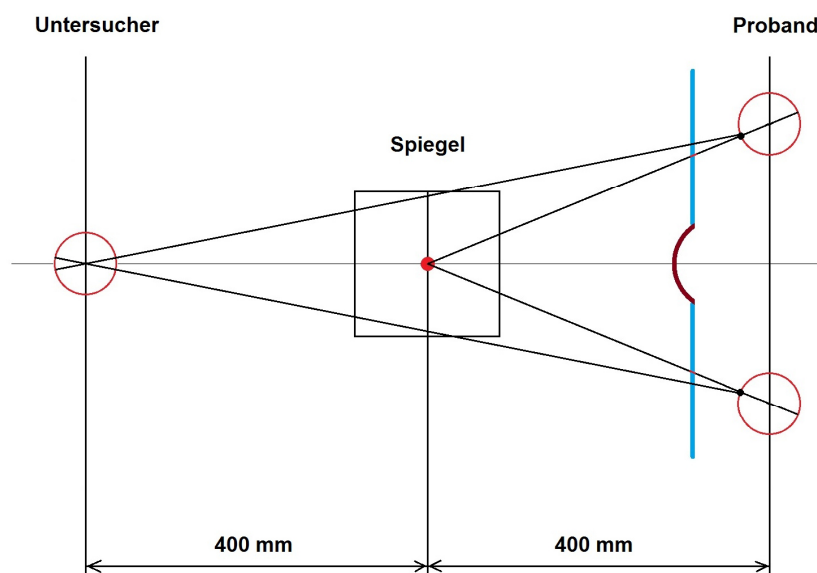


Abbildung 30 Falsche Durchführung der Spiegelmethode. Der Untersucher prüft monokular.

Spiegelmethode mittels Kamera

Dieselbe Methode wird nun mittels Kamera durchgeführt. Die Kamera befindet sich dabei an der ursprünglichen Position des Untersuchers. Bei jedem Probanden werden zwei weitere Messreihen am Spiegel bei zentraler Fixation durchgeführt. Für die erste Messreihe wird der Spiegel an dem vorbereiteten Hubtisch mit doppelseitigem Klebeband auf einem Verschiebereiter exakt in einer derartigen Position fixiert, dass bei monokularer, parallaxefreier Betrachtung von

oben die Hilfslinie des Spiegels mit der Mittellinie der Führungsschiene fluchtet. Abbildung 31 zeigt diese Anordnung.

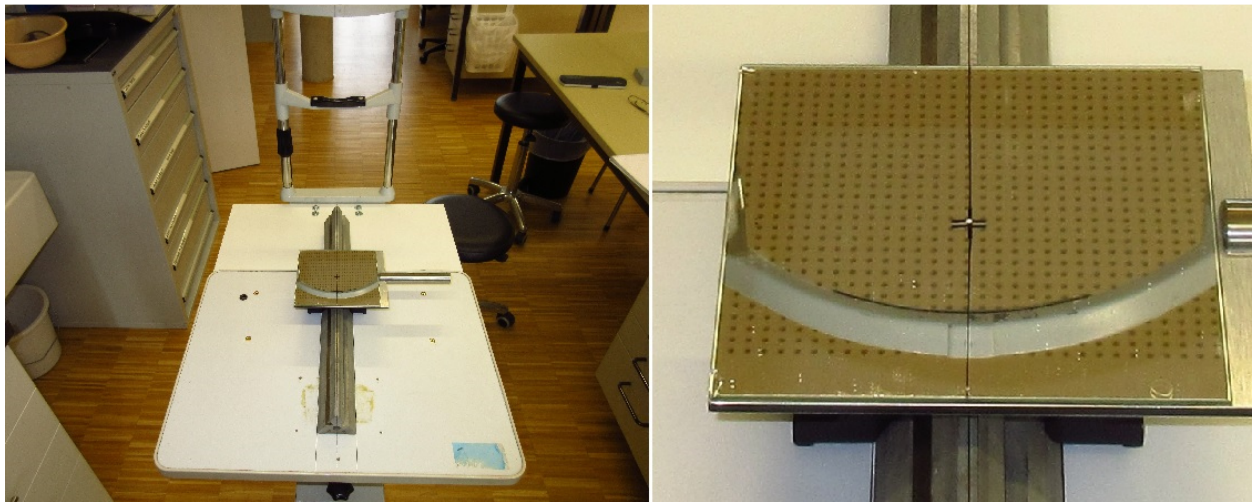


Abbildung 31 Vorläufiger Versuchsaufbau für die Messung der Nah-PD am Spiegel mittels KSS und Kamera (links). Ausrichtung des Spiegels auf der Führungsschiene (rechts). Hilfslinie des Spiegels und Mittellinie der Schiene liegen in einer Flucht

Kinn und Stirn des Probanden müssen fest an der KSS anliegen. Der Spiegel wird so vor dem Probanden positioniert, dass die Einstellentfernung zwischen Fixationsmarke und rechtem bzw. linkem Hornhautscheitel der Probanden jeweils 400 mm beträgt. Anschließend werden den Probanden ihre Brillenfassungen mit dem sich darauf befindenden Messaufsatz sorgfältig aufgesetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Brille gerade sitzt und sich der Messaufsatz möglichst mittig auf der Fassung befindet. Der Untersucher richtet seine eigene Kopfposition so aus, dass sich sein eigenes prüfendes Auge im Lot über der Mittellinie befindet. Aus dieser Position blickt er über den Spiegel auf den Messaufsatz am Probanden. Die Mittellinie des Spiegels und die Mitte des Messaufsatzes müssen dabei übereinanderliegen. Außerdem muss die vertikale Linie des auf dem Dorn angezeichneten Kreuzes mit der vertikalen Mittellinie der dahinterliegenden Skala fluchten. Die Kopfhaltung des Probanden wird an der KSS solange nachjustiert, bis Hilfslinie des Spiegels, vertikale Linie des Kreuzes auf dem Dorn und vertikale Mittellinie der Skala des Messaufsatzes in einer Flucht liegen. Jetzt befindet sich der Proband in der optimalen Position vor der Fixationsmarke des Spiegels.

Nun wird die Kamera auf einem Stativ gegenüber der Probanden so positioniert, dass auf dem Display sichtbar alle vertikalen Linien des Spiegels und des Messaufsatzes, wie oben beschrieben, miteinander fluchten. Der Abstand der Kameralinsenvorderfläche (da die Lage der Eintrittspupille nicht bekannt ist) zur Fixationsmarke auf dem Spiegel ist dabei *idealerweise* genauso groß wie die Einstellentfernung des Probanden. Das Prinzip dieser Anordnung wird in Abbildung 32 deutlich, wobei in jener Abbildung die Messung gerade am Kunstkopf erfolgt, weshalb keine KSS und Führungsschiene benötigt werden und entsprechend nicht abgebildet sind.



Abbildung 32 Messung der Nah-PD über den Spiegel unter Benutzung einer Kamera.

In dieser Position werden durch den Untersucher zehn Fotos ausgelöst. Dies geschieht mittels elektrischem Fernauslöser, um Erschütterungen oder ein Verwackeln der Kamera zu vermeiden. Der Proband darf zwischen den einzelnen Fotos blinzeln und Augenbewegungen ausführen, allerdings darf er seinen Kopf nicht bewegen und muss beim Auslösen der Fotos die Marke auf dem Spiegel fixieren. Aus den entstandenen Fotos werden anschließend in Microsoft Paint die monokularen Pupillendistanzen und die Gesamt-PD ausgewertet und die Werte arithmetisch gemittelt. Der Ablauf der Auswertung mit diesem Programm wird in Kapitel 2.3.1 ausführlich beschrieben.

Im oben beschriebenen Messaufbau wurde zunächst die Nah-PD mit der Kamera über den Spiegel bei statischer Kopfhaltung des Probanden gemessen.

Dieselbe Methode wird nun für jeden Probanden bei freier, habitueller Kopfhaltung durchgeführt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Messungen nicht an der KSS durchgeführt werden und der Proband während der Messung seine natürliche Kopfhaltung einnehmen darf. Es muss lediglich die Messentfernung eingehalten werden. In dieser Position wird für Proband 1 bis 3 jeweils eine Messreihe von je zehn Fotos durchgeführt. Der Kunstkopf wird in dieser Untersuchung nicht gemessen, da er keine habituelle Kopfhaltung besitzt.

Bei der Durchführung der Spiegelmethode mittels Kamera wird theoretisch die Nah-PD auf Irisblattebene gemessen, da auf den entstandenen Fotos lediglich die Pupillen des Probanden, jedoch nicht die tatsächlichen Durchblickspunkte auf Brillenglasebene gesehen werden.

Direkte Kameramessung

Die nachfolgenden Kameramessungen bei direktem Blick in das Objektiv werden alle an dem vorbereiteten Hubtisch bei statischer Kopfhaltung durchgeführt. Für jeden Probanden werden nun zwei Messreihen bei zentraler, direkter Fixation der Fixationsmarke am Kameraobjektiv erhoben. Kinn und Stirn der Probanden müssen fest an der KSS anliegen. Zur folgenden Justierung wird bereits die Ringbeleuchtung eingeschaltet, damit die Augen des Probanden vorab an deren Leuchtdichte adaptieren können. Ebenso wird die Kamera vor Beginn der Justierung eingeschaltet, damit das Objektiv bei der Messung der Einstellentfernung ausgefahren ist. Bei nachträglichem Einschalten würde sich andernfalls die Einstellentfernung des Probanden um die Länge des ausgefahrenen Objektivs verkürzen. Die Kamera wird auf dem Verschiebereiter mittels Metermaß so vor dem Probanden positioniert, dass die Einstellentfernung zwischen Fixationsmarke und den Hornhautscheiteln beider Augen des Probanden 400 mm beträgt. Damit der Proband auch in vertikaler Richtung mittig in das Kameraobjektiv blickt, wird die Neigung der Kamera mittels Anschlagsschraube in dem Maße nach oben oder unten justiert, bis Fixationsmarke und Blendenöffnung aus Sicht des Probanden in ihrer Höhe fluchten. Dazu benötigt es beim Einstellen der Anschlagsschraube verbale Rücksprache mit dem Probanden, da jener diese Position beurteilen muss. Weiter wird dem Probanden wieder seine Brillenfassung mit möglichst

mittig angebrachtem Messaufsatz aufgesetzt. Wie bei den bereits vorangegangenen Messungen ist auch hierbei wieder darauf zu achten, dass die Brille fest und gerade auf der Nase des Probanden sitzt. Nun wird unter Zuhilfenahme des Messaufsatzes am Kameradisplay die Kopfposition des Probanden kontrolliert. Hierbei wird der Kopf an der KSS solange nachjustiert, bis er mittig im Display erscheint und die vertikale Linie des Kreuzes auf dem Dorn und die vertikale Mittellinie der dahinterliegenden Skala miteinander in einer Flucht liegen. Abbildung 33 zeigt den Versuchsaufbau.



Abbildung 33 Der Proband (links im Bild) trägt Fassung mit Messaufsatz. Er fixiert die Fixationsmarke vor dem Objektiv der Kamera (rechts). Weiter zu sehen die Führungsschiene (zentral) mit Verschiebereiter sowie Fernauslöser (rechts unten)

Sind alle Einstellungen abgeschlossen, kann mit den Messungen begonnen werden. Die erste Messreihe wird bei der jeweiligen Vorneigung durchgeführt, welche eingangs an den einzelnen Fassungen bei habitueller Kopf- und Körperhaltung gemessen wurde. Der Proband fixiert binokular die Fixationsmarke vor dem Objektiv. In dieser Position werden durch den Untersucher zehn Fotos ausgelöst. Dies geschieht auch bei diesen Messungen mittels elektrischem Fernauslöser, um Erschütterungen oder ein Verwackeln der Kamera zu vermeiden. Der Proband darf zwischen den einzelnen Fotos blinzeln und Augenbewegungen ausführen, allerdings darf er seinen Kopf nicht bewegen und muss beim Auslösen der Fotos die Fixationsmarke vor dem Objektiv fixieren. Aus den entstandenen Fotos werden anschließend in Microsoft Paint die monokularen und binokularen

Pupillendistanzen ausgewertet und die Werte arithmetisch gemittelt. Der Ablauf der Auswertung wird in Kapitel 2.3.1 ausführlich beschrieben.

Im oben beschriebenen Messaufbau wurde zunächst die Nah-PD mit der Kamera bei unveränderter, anfangs gemessener Vorneigung gemessen. Nun wird für jeden Probanden eine weitere Messreihe bei einer um 10° steileren Inklination der Fassung durchgeführt. Wie in Abbildung 34 zu sehen, wird zur Umsetzung das Mittelteil an den Bügelscharnieren inkliniert, da eine Änderung der Inklination in dieser Größenordnung direkt am Schließblock nicht möglich ist.

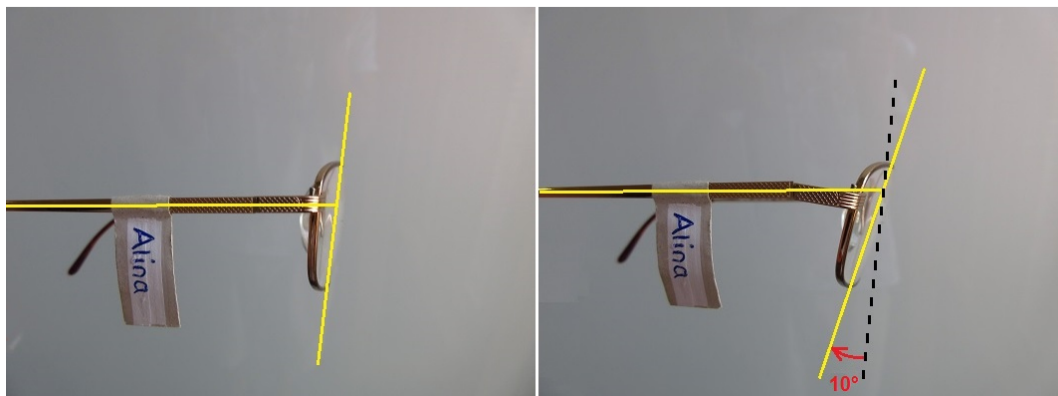


Abbildung 34 Inklination der Fassung wie eingangs gemessen (links) und Inklinations- Δ um 10° für die zweite Messreihe (rechts)

Diese weitere Messreihe wird bei identischem Versuchsaufbau und exakt gleicher Vorgehensweise durchgeführt. Auch hier werden zehn Fotos ausgelöst, die später nach den monokularen Pupillendistanzen und der Gesamt-PD für die Nähe ausgewertet werden.

Das Prinzip dieser Messung ist in Abbildung 35 schematisch dargestellt. Es gilt zu beachten, dass auf den entstandenen Fotos lediglich die Pupille des Probanden auf Irisblattebene zu sehen ist, jedoch nicht der tatsächliche Durchblickspunkt auf Brillenglasebene. Das heißt, der Untersucher sieht auf den späteren Fotos die Pupille des Probanden hinter einer Stelle im Brillenglas, die nicht dem tatsächlichen Durchblickspunkt für die Nähe im Brillenglas selbst entspricht. Dieser Tatsache muss sich der Untersucher bewusst sein. Wird die aus den Fotos ausgewertete Pupillendistanz als Nah-PD für die anzufertigende Brille herangezogen, sind die Gläser falsch zentriert. Der eingearbeitete Inset wäre zu klein.

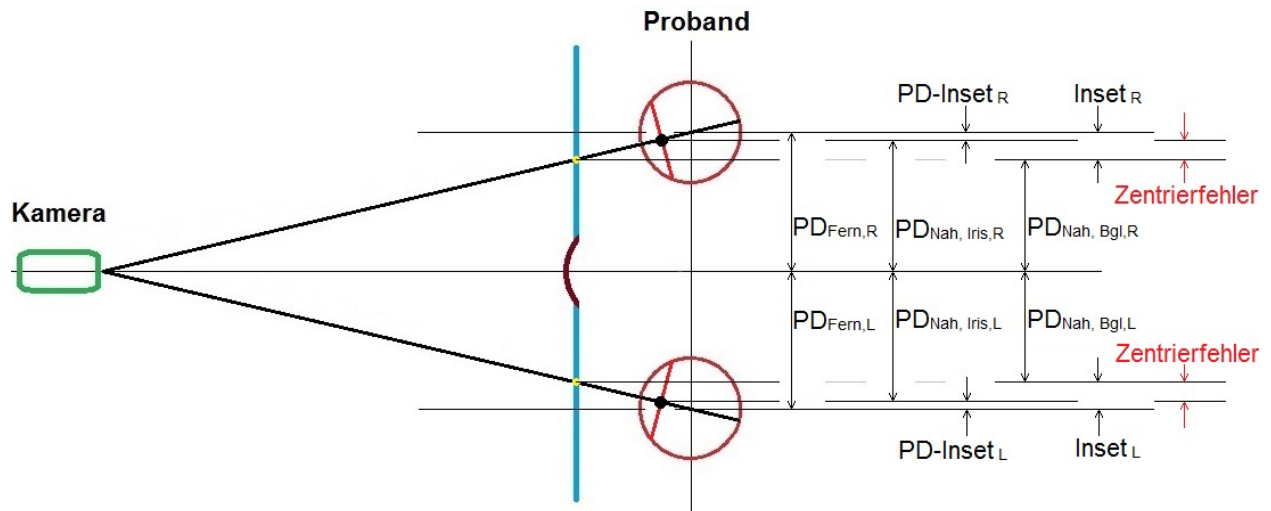


Abbildung 35 Schematische Darstellung der direkten Kameramessung. Zusätzlich machen die eingezeichneten Pupillendistanzen den Unterschied zwischen gemessenem und benötigtem Inset deutlich, deren Differenz als potenzieller Zentrierfehler resultiert.

Aus der gemessenen Nah-PD auf Irisblattebene lässt sich *monokular* unter Einbezug der Fern-PD der Inset auf Brillenglasebene berechnen. Dies wird in Kapitel 3.5 genauer erläutert, da es hierbei noch etwas zu beachten gibt.

Direkte Kameramessung mit Landoltring

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, besitzt die Fixationsmarke einen Durchmesser von 2 mm. Der Sehwinkel α in Winkelminuten lässt sich auf 400 mm Distanz mittels Formel 2.13 berechnen. Dabei sind alle Strecken in Millimetern einzusetzen.

$$\alpha ['] = 2 * \operatorname{atan} \left(\frac{\frac{\text{Durchmesser Fixationsmarke}}{2}}{\text{Einstellentfernung}} \right) * 60' \quad (2.13)$$

Die entsprechende Visusanforderung V der Fixiermarke ist der Kehrwert des Sehwinkels α in Winkelminuten (Formel 2.14).

$$V = \frac{1}{\alpha [']} \quad (2.14)$$

Daraus errechnet sich für die bisherigen Messungen bei direktem Blick in die Kamera eine Visusanforderung von $V = 0,06$. Diese ist relativ niedrig. Da die Augen an Akkommodation in der Regel lediglich so viel wie nötig und gleichzeitig so wenig wie möglich aufbringen, wird bei Fixation nahe gelegener Objekte mit niedriger Visusanforderung im Grunde nie die theoretisch berechnete Einstellrefraktion vom Auge aufgebracht. Die Einstellrefraktion A_E in Dioptrien errechnet sich beim Emmetropen auf eine bestimmte Einstellentfernung a_E vereinfacht mittels Formel 2.15. Bei dieser vereinfachten Berechnung wird die Einstellentfernung a_E mit positivem Vorzeichen in Metern eingesetzt.

$$A_E = \frac{1}{a_E} \quad (2.15)$$

Das bedeutet, die Probanden müssten auf die Distanz von 0,4 m theoretisch +2,50 dpt Akkommodation aufbringen. Aufgrund der nicht besonders hohen Visusanforderung kann es durchaus sein, dass sie weniger akkommodieren, da das visuelle System die Fixationsmarke bereits mit weniger betriebenem Aufwand gut erkennen kann. Dieses Phänomen nennt sich *lag of accommodation* (Saishin, M. et al. 1982).

Wie in Kapitel 2.1.6 beschrieben, geht ein gewisser Anteil an akkommodativer Konvergenz mit der aufgebrachten Akkommodation einher. Das heißt, bei weniger aufgebrachter Akkommodation wird theoretisch weniger akkommodative Konvergenz aufgebracht. Dieser Zusammenhang soll in der folgenden Messreihe geprüft werden. Diese Messung wird lediglich an einem Probanden durchgeführt.

Hierzu wird auf die Fixationsmarke ein ausgedruckter Landoltring angebracht, dessen Öffnung etwa 1/5 des Durchmessers der Fixationsmarke entspricht. Dies wird in Abbildung 36 deutlich.

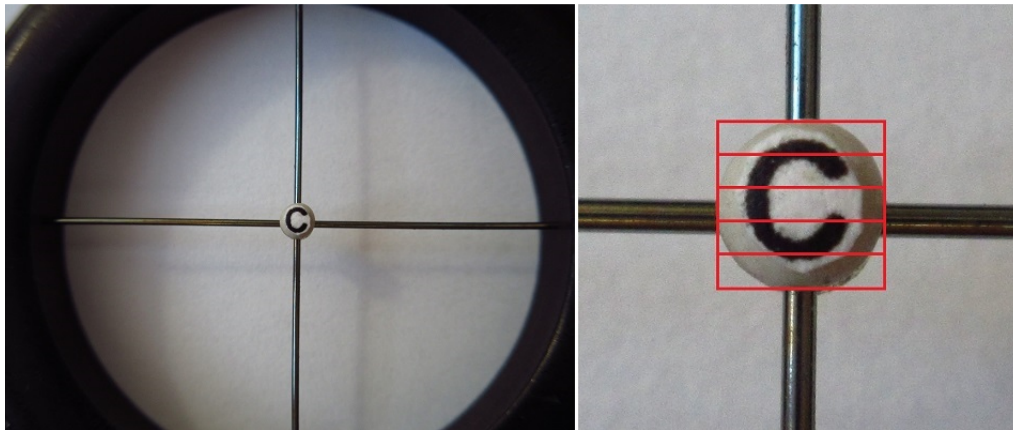


Abbildung 36 Fixationsmarke mit aufgeklebtem Landoltring (links) und Größenverhältnis zum Gesamtdurchmesser der Marke (rechts)

Das heißt, die Größe der Öffnung beträgt etwa 0,4 mm. Bei Berechnung mittels Formeln 2.13 und 2.14 ergibt sich dafür eine Visusanforderung von etwa $V = 0,29$. Hiermit ist nun eine höhere Anforderung an das visuelle System gestellt als bei den Messungen zuvor. Mit der modifizierten Fixationsmarke wird bei einem Probanden eine weitere Messreihe durchgeführt. Die Vorgehensweise bezüglich Messaufbau und Justierung an der KSS ist identisch zu den vorangegangenen Kameramessungen. Der einzige Unterschied liegt darin, dass der gesamte Holzring zwischen jeder einzelnen Aufnahme in eine andere Richtung gedreht wird, wodurch der Landoltring stets eine andere Orientierung besitzt. Der Proband gibt die jeweilige Orientierung der Öffnung mittels Handzeichen an. Prinzipiell hat der Ring acht mögliche Orientierungen; vier gerade und vier schräge. Das bedeutet, es besteht eine nicht korrigierte Ratewahrscheinlichkeit von $1/8$ beziehungsweise 12,5%. Wird allerdings berücksichtigt, dass die Öffnung des Rings exakt in die Richtung eines Drahtes zeigt, wie in Abbildung 36 zu sehen ist, steigt die unkorrigierte Ratewahrscheinlichkeit auf $1/4$ beziehungsweise 25%. Das bedeutet, sobald sich das Fadenkreuz in einer geraden Position befindet, fallen von vornherein vier Möglichkeiten, nämlich die vier schrägen, weg. Die Wahrscheinlichkeit, dass nun bei den restlichen verbleibenden vier geraden Möglichkeiten durch freies Raten des Probanden zufällig die korrekte Orientierung getroffen wird, liegt bei 25%. Darüber kann bei dieser Messung jedoch hinweggesehen werden, da nicht das Ziel einer Visusprüfung verfolgt wird.

Es werden wieder zehn Aufnahmen erstellt, welche später in Microsoft Paint nach den monokularen Pupillendistanzen und der Gesamt-PD für die Nähe ausgewertet werden.

2.3 Vorgehen

Im Folgenden wird beschrieben, auf welche Weise die Daten aus den entstandenen Fotos ermittelt werden sowie welche Daten schließlich miteinander verglichen werden.

2.3.1 Auswertung der Fotos

Die Auswertung der Fotos erfolgt mit dem Programm „Paint“ der Firma Microsoft über die Anzahl der Pixel in x- und y-Koordinaten.

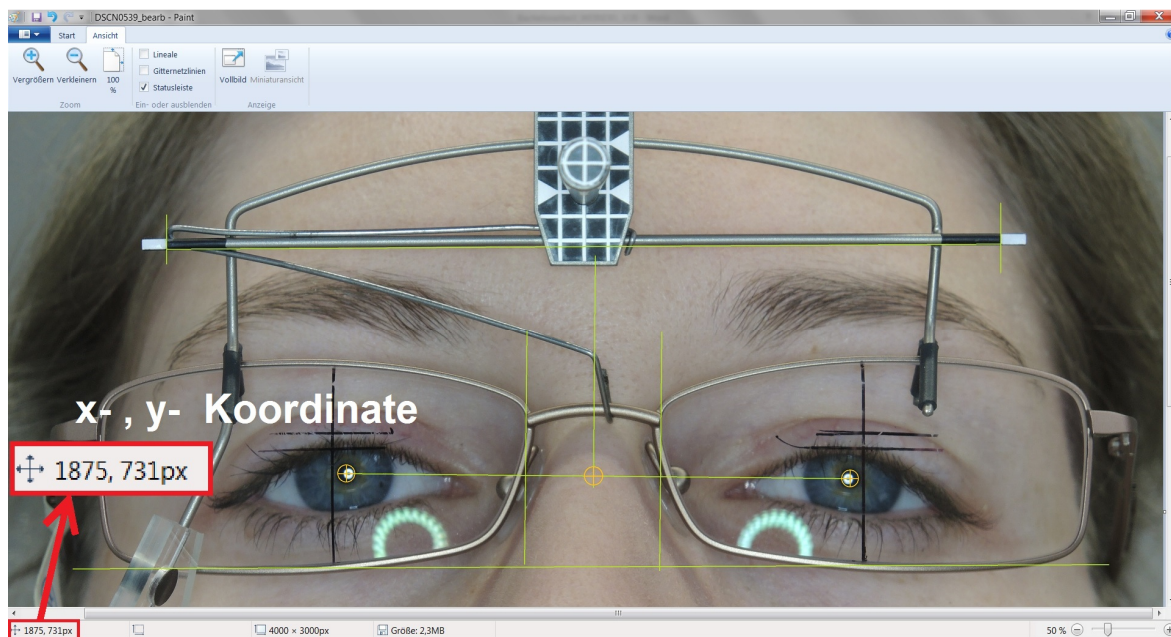


Abbildung 37 Auswertung in Paint. Links unten sind die Pixelkoordinaten der aktuellen Position des Cursors im Bild abzulesen

Abbildung 37 zeigt einen Screenshot der Auswertung eines Fotos in Paint. Im linken unteren Eck wird die x- und y- Koordinate der aktuellen Cursorposition im Bild angezeigt. Dazu wird die Anzahl der Pixel über die Länge einer bekannten Strecke ermittelt und der Umrechnungsfaktor bestimmt. Hiermit lässt sich nun die Länge einer anderen unbekannten Strecke in gleicher Tiefenebene ermitteln.

Liegt nun eine Strecke schräg im Bild, muss die Anzahl der Pixel über die Diagonale ermittelt werden. Dies gilt sowohl für die Bestimmung des Umrechnungsfaktors als auch für die zu ermittelnde Strecke in mm. Dazu findet der Satz des Pythagoras Anwendung (Formel 2.16).

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.16)$$

Für a und b werden jeweils die Pixel in x-Richtung und in y-Richtung durch Subtraktion ermittelt. Dies ist in Abbildung 38 dargestellt.

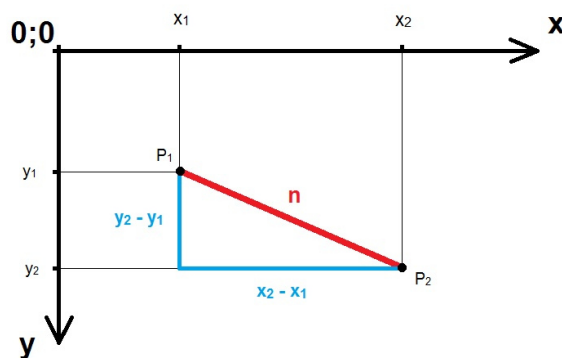


Abbildung 38 Prinzip zur Ermittlung der Pixelzahl für die zur Berechnung notwendigen Strecken in Paint

Damit lässt sich Formel 2.16 dahingehend umformulieren, dass für a und b Koordinatenpunkte eingesetzt werden; n_{pix} ist die Anzahl der Pixel über die Diagonale. So ergibt sich Formel 2.17.

$$n_{pix} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.17)$$

Um nun den Umrechnungsfaktor zu erhalten, benötigt man eine Strecke bekannter Länge auf dem Foto. Dazu dient der Messaufsatz, dessen horizontaler Steg eine exakte Länge von 100 mm besitzt. Diese Strecke misst sich genau zwischen den schwarz-weißen Kanten links und rechts am Steg. Jener ist in Abbildung 39 dargestellt.

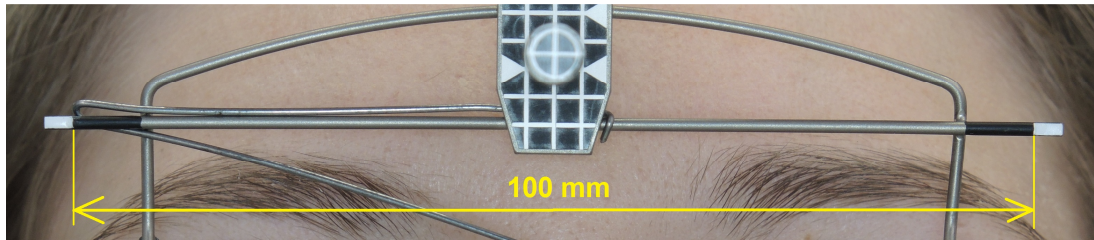


Abbildung 39 Referenzsteg zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors

Die Koordinaten werden von der Anzeige abgelesen und mittels Formel 2.17 wird die Anzahl der Pixel über diese Strecke ermittelt.

Der Umrechnungsfaktor ergibt sich jetzt, wie oben bereits beschrieben, durch die Division dieser Referenzstrecke durch die Anzahl n_{pix_Steg} der Pixel. Die Referenzstrecke ist auf allen Fotos stets 100 mm, weshalb dieser Wert fix in Formel 2.18 eingesetzt werden kann.

$$Umrechnungsfaktor = \frac{100\text{ mm}}{n_{pix_Steg}} \quad (2.18)$$

Der Umrechnungsfaktor muss für jedes Foto neu bestimmt werden, da die Pixelverhältnisse aller Strecken lediglich innerhalb einer Aufnahme zueinander passen.

Danach wird die Mitte des Fassungsstegs bestimmt. Dazu wird das Fadenkreuz jeweils auf den innersten Fassungsrand des rechten und linken Glases gefahren. Die zu diesen zwei Punkten zugehörigen x-Koordinaten werden von der Koordinaten-Anzeige abgelesen und in Formel 2.19 eingesetzt. Daraus ergibt sich die entsprechende x-Koordinate der Stegmitte.

$$x_{Stegmitte} = \frac{x_2 - x_1}{2} + x_1 \quad (2.19)$$

Die Zuordnung der abgelesenen x-Koordinaten zu x_1 und x_2 wird in Abbildung 38 deutlich. x_2 ist stets diejenige mit dem größeren Zahlenwert, beziehungsweise die zum rechten Punkt zugehörige. Die Stegmitte wird mittels einer eingezogenen vertikalen Geraden durch diesen Punkt markiert.

Weiter werden die Pupillenmitten mit eingezeichneten Fadenkreuzen gekennzeichnet. Dies muss sehr präzise erfolgen, da andernfalls Fehler bei der Auswertung entstünden.

Für die Strecken zwischen der markierten Fassungsmitte und den markierten Pupillenmitten wird über Formel 2.17 die Anzahl der Pixel bestimmt.

Durch Multiplikation mit dem oben berechneten Umrechnungsfaktor ergeben sich daraus die monokularen Pupillendistanzen (Nähe) in mm (Formel 2.20).

$$PD_N = n_{pix_PD} * \frac{100 \text{ mm}}{n_{pix_Steg}} \quad (2.20)$$

PD_N = Nah-PD [mm]

n_{pix_PD} = Anzahl der Pixel über die Strecke der Pupillendistanz

n_{pix_Steg} = Anzahl der Pixel über die Strecke des Referenzstegs

Nachdem die Koordinaten der rechten und linken Pupillenmitte ohnehin abgelesen werden, wird oben beschriebene Vorgehensweise zur Berechnung der monokularen Pupillendistanzen nun noch einmal zur Ermittlung der Gesamt-PD angewandt.

Zur Verwaltung und automatischen Berechnung dieser Daten wird eine geeignete Excel-Tabelle erstellt. Jene ist für jeden Probanden nach rechter, linker und gesamter Pupillendistanz spaltenweise unterteilt. Zur Veranschaulichung zeigt Tabelle 2 diese Einteilung. Eine größere Darstellung und weitere Tabellen dieser Art befinden sich auf der beigefügten CD-ROM.

Tabelle 2 Excel-Tabelle zur Auswertung der entstandenen Fotos. Im Beispiel: Proband 3, Messung bei direktem Blick in die Kamera, VN wie eingangs gemessen

Messung	Bild-nummer	Steg					Rechtes Auge				Linkes Auge				Gesamt					
		x-Abstand	y-Abstand	diagonal Abst.	Stegweite	Faktor	x-Abstand	y-Abstand	diagonal Abst.	Nah-PD R	x-Abstand	y-Abstand	diagonal Abst.	Nah-PD L	x-Abstand	y-Abstand	diagonal Abst.	Nah-PD Ges.		
		[pix]	[pix]	[pix]	[mm]	[mm/pix]	[pix]	[pix]	[pix]	[mm]	[pix]	[pix]	[pix]	[mm]	[pix]	[pix]	[pix]	[mm]		
1	369	2113	69	2114,13	100	0,0473	626	16	626,20	29,62	629	16	629,20	29,76	1255	32	1255,41	59,38		
2	370	2113	71	2114,19	100	0,0473	624	16	624,21	29,52	629	16	629,20	29,76	1253	32	1253,41	59,29		
3	371	2113	72	2114,23	100	0,0473	626	16	626,20	29,62	629	16	629,20	29,76	1255	32	1255,41	59,38		
4	372	2113	72	2114,23	100	0,0473	625	17	625,23	29,57	629	17	629,23	29,76	1254	34	1254,46	59,33		
5	373	2113	74	2114,30	100	0,0473	626	17	626,23	29,62	628	17	628,23	29,71	1254	34	1254,46	59,33		
6	374	2114	75	2115,33	100	0,0473	625	17	625,23	29,56	629	18	629,26	29,75	1254	35	1254,49	59,30		
7	375	2113	75	2114,33	100	0,0473	628	18	628,26	29,71	627	17	627,23	29,67	1255	35	1255,49	59,38		
8	376	2114	75	2115,33	100	0,0473	626	19	626,29	29,61	627	19	627,29	29,65	1253	38	1253,58	59,26		
9	377	2115	76	2116,37	100	0,0473	628	19	628,29	29,69	627	19	627,29	29,64	1255	38	1255,58	59,33		
10	378	2114	77	2115,40	100	0,0473	628	18	628,26	29,70	627	19	627,29	29,65	1255	37	1255,55	59,35		
Mittelwert STABW. S										29,62 0,062	Mittelwert STABW. S				29,71 0,053	Mittelwert STABW. S				59,33 0,041

2.3.2 Vergleich der Pupillendistanzen

Sitzt die Fassung mit seitlichem Versatz vor den Augen, entspricht die auf der Fassung angezeichnete und anschließend ausgemessene monokulare Fern-PD nicht den tatsächlichen Gegebenheiten.

Dies ist bei der Auswertung der Fotos zur Ermittlung der Nah-PD ebenso der Fall, da hier als Referenzpunkt zur Abtragung der monokularen PD die Stegmitte der Fassung herangezogen wird.

Ferner beeinflusst auch schon eine leichte Drehung des Kopfes die auf den Brillengläsern angezeichnete monokulare PD, sowohl für die Ferne als auch für die Nähe. Gleiches gilt auch bei seitlichem Versatz zwischen Untersucher bzw. Kamera und Probanden. Diese Einflüsse und deren Auswirkung sind in den Abbildungen 40 bis 43 schematisch dargestellt und verdeutlicht.

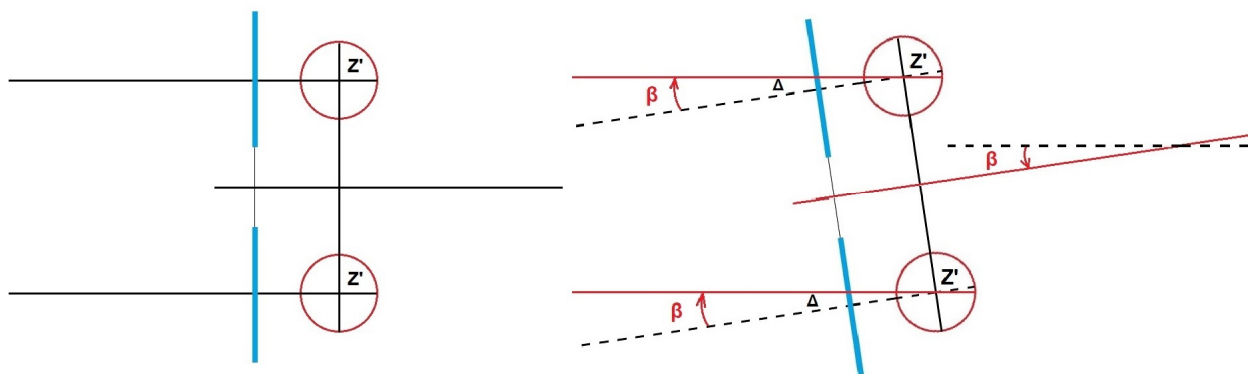


Abbildung 40 Blick in die Ferne bei gerader Kopfhaltung (links) und die Auswirkung auf die monokulare Fern-PD bei einer Kopfdrehung um den Winkel β (rechts)

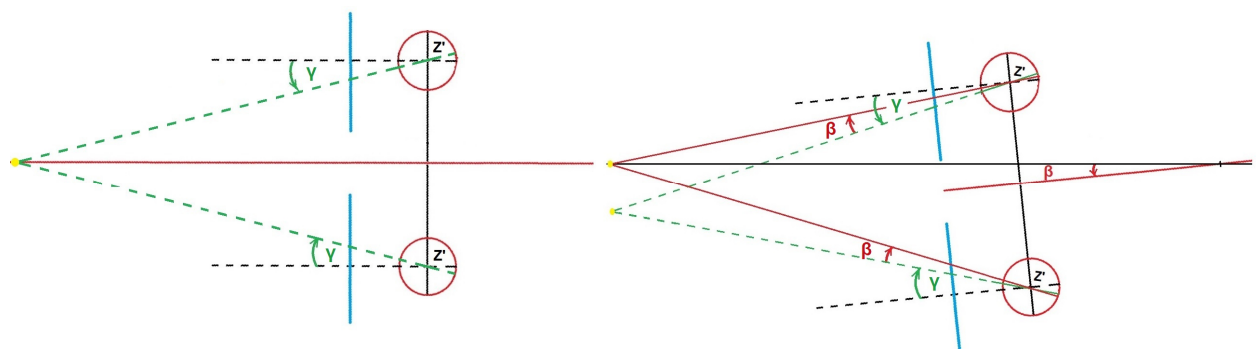


Abbildung 41 Blick in die Nähe bei gerader Kopfhaltung (links) und die Auswirkung auf die monokulare Nah-PD bei einer Kopfdrehung um den Winkel β (rechts)

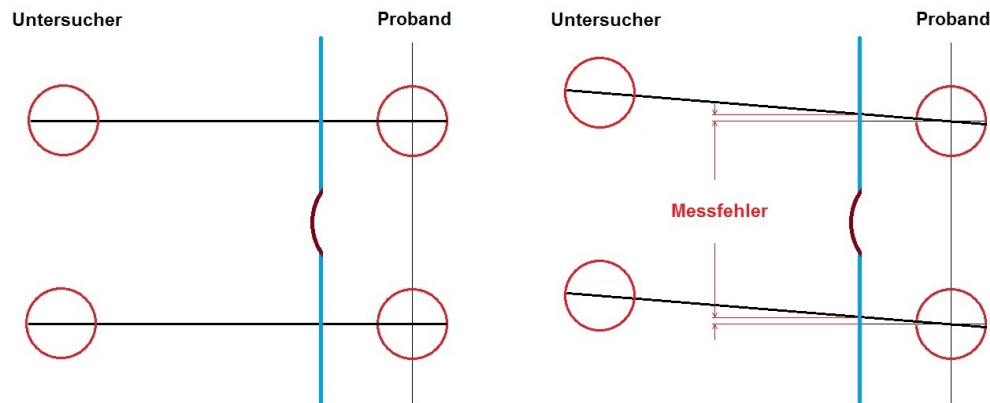


Abbildung 42 Kontrolle der monokularen Fern-PD bei exakt gegenüberliegenden Augenpaaren zwischen Untersucher und Probanden (links) und Auswirkung auf die monokulare Fern-PD bei seitlichem Versatz zwischen Untersucher und Probanden (rechts)

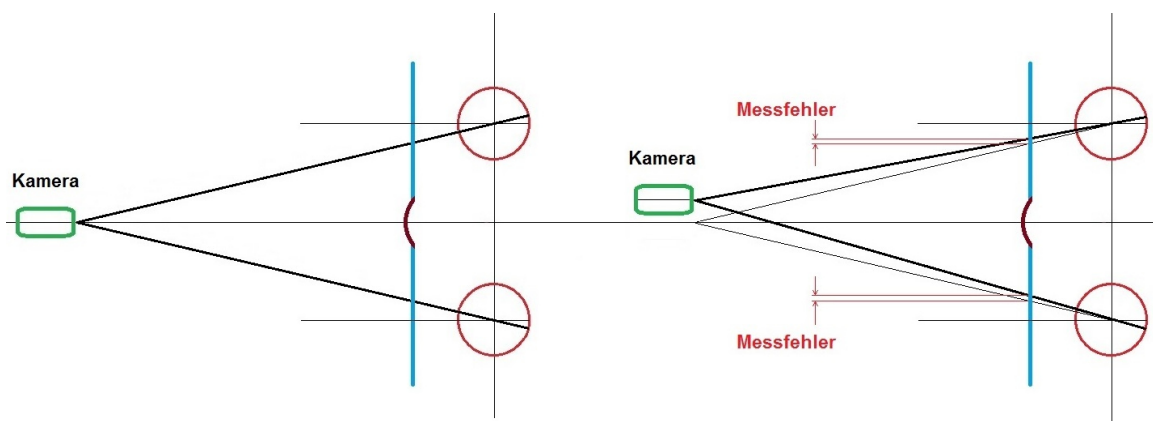


Abbildung 43 Messung der Nah-PD mittels Kamera (links) und Auswirkung auf die monokulare Fern-PD bei seitlichem Versatz der Kamera (rechts)

Zur Kontrolle einer geraden, nicht seitenversetzten Kopfhaltung kommt der bereits beschriebene Messausatz zum Einsatz. Mithilfe des Dorns und der dahinterliegenden Skala kann eine potenzielle Kopfdrehung oder ein seitlicher Versatz bei den Messungen detektiert werden.

Befindet sich der Kopf in gerader Position, liegen die vertikale Linie des Kreuzes (Dorn) und die vertikale Mittellinie der dahinterliegenden Skala in einer Flucht. Bei einer Kopfdrehung fluchten diese vertikalen Linien nicht mehr, sodass sie seitlich versetzt sind. Aus dieser Erkenntnis kann bei bekannten Maßen des Aufsatzes theoretisch der Winkel der Kopfdrehung trigonometrisch errechnet werden. Für die Berechnung entspricht der Dorn der Ankathete (Abbildung 44). Seine

Länge beträgt 33 mm. Der seitliche Versatz des Kreuzes gegenüber der vertikalen Mittellinie der Skala entspricht der Gegenkathete. Der Linienabstand der Skala beträgt 3 mm.

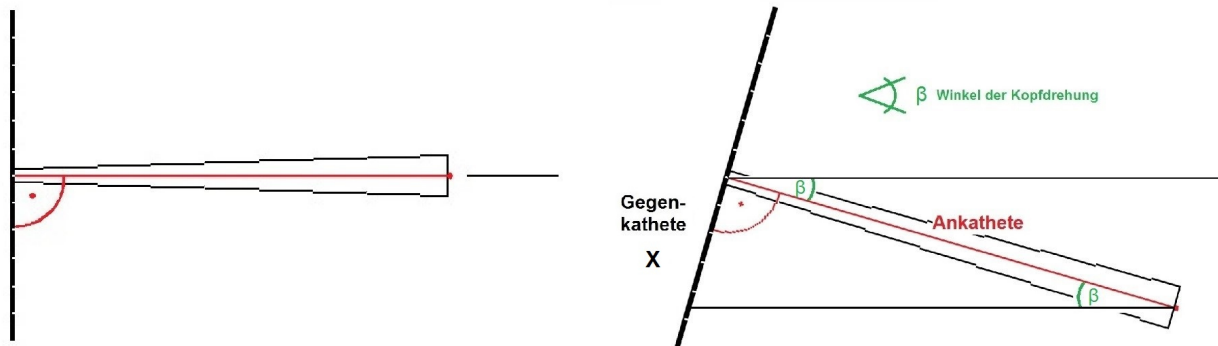


Abbildung 44 Grafische Darstellung des Messaufsatzes aus der Ansicht von oben bei gerader Kopfhaltung (links) und bei einer Kopfdrehung um den Winkel β (rechts)

Der Winkel β der Kopfdrehung lässt sich mittels Formel 2.21 über den Tangens berechnen.

$$\beta = \arctan\left(\frac{x}{33 \text{ mm}}\right) \quad (2.21)$$

x = seitlicher Versatz des Kreuzes zur vertikalen Mittellinie der Skala [mm]

Ist der Kopfdrehungswinkel berechnet, lässt sich die Beeinflussung auf die monokularen Pupillendistanzen sowohl für die Ferne als auch für die Nähe näherungsweise herausrechnen.

Zunächst werden die monokularen Pupillendistanzen für die Ferne betrachtet. Hierzu sind in Abbildung 45 die für die Berechnung relevanten Strecken dargestellt. Außerdem wird deutlich, dass die Augen beim Blick in die zu fixierende Richtung eine zur Kopfdrehung entgegengesetzte Drehung vollziehen – und zwar um den Winkel der Kopfdrehung selbst. Bei diesem Vorgang gibt es ein kopfdrehungs-äußeres Auge, in Abbildung 45 das obere, und ein kopfdrehungs-inneres Auge, in Abbildung 45 das untere.

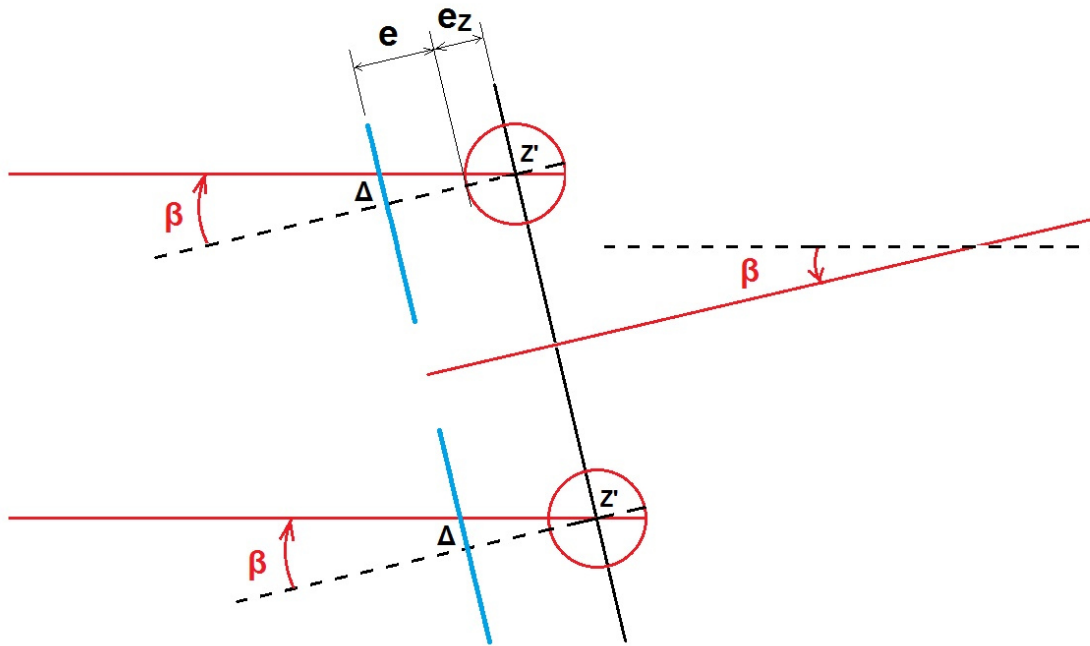


Abbildung 45 Strecken- und Winkelbeziehungen bei einer Kopfdrehung mit Blick in die Ferne. Kopfdrehungs-äußeres Auge (oben) und kopfdrehungs-inneres Auge (unten)

Die Strecke Δ auf Brillenglasebene lässt sich mit dem oben errechneten Kopfdrehungswinkel β über den Tangens mittels Formel 2.22 berechnen.

$$\Delta = \tan(\beta) * (e + e_z) \quad (2.22)$$

Bei genauerer Betrachtung der Abbildung fällt auf, dass bei einem Auge die Strecke Δ auf die monokulare Fern-PD addiert und beim anderen Auge subtrahiert werden muss. Deshalb wird nun eine Unterscheidung der Augen vorgenommen. Zunächst wird das kopfdrehungs-äußere Auge betrachtet. Hier muss Δ von der Fern-PD subtrahiert werden (Formel 2.23).

$$PD_{F_au\ddot{a}u\ddot{e}n_neu} = PD_{F_au\ddot{a}u\ddot{e}n_alt} - \Delta \quad (2.23)$$

Wird für Δ Formel 2.22 eingesetzt, so ergibt sich Formel 2.24, mit welcher die PD direkt berechnet werden kann.

$$PD_{F_au\ddot{a}u\ddot{e}n_neu} = PD_{F_au\ddot{a}u\ddot{e}n_alt} - [\tan(\beta) * (e + e_z)] \quad (2.24)$$

Gleiches gilt für das kopfdrehungs-innere Auge, mit dem Unterschied, dass hier die Strecke Δ zu der monokularen Fern-PD addiert werden muss. Daraus ergibt sich Formel 2.25.

$$PD_{F_innen_neu} = PD_{F_innen_alt} + [\tan(\beta) * (e + e_z)] \quad (2.25)$$

Auch die Verrechnung der Kopfdrehung auf die Nah-PD ist denkbar einfach. Prinzipiell erfolgt die Berechnung ähnlich wie bei der Fern-PD. Hier muss ebenfalls jedes Auge separat betrachtet werden. Die für die Berechnung benötigten Strecken sind in Abbildung 46 dargestellt.

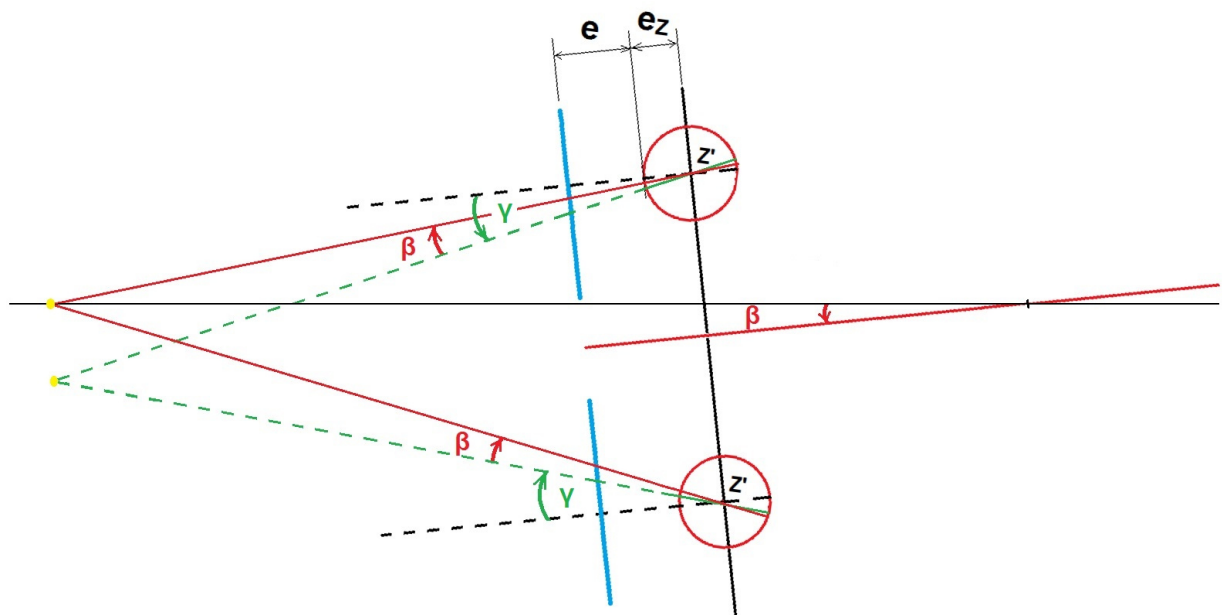


Abbildung 46 Strecken- und Winkelbeziehungen bei einer Kopfdrehung mit Blick in die Nähe. Kopfdrehungs-äußeres Auge (oben) und kopfdrehungs-inneres Auge (unten)

Ebenso wie in der oben geschilderten Situation beim Blick in die Ferne vollziehen die Augen bei kleinen Kopfdrehungen eine entgegengesetzte Blickbewegung, näherungsweise um die gleichen Winkel β .

Um die durch Kopfdrehung veränderte Nah-PD zu korrigieren, müssen in diesem Fall die Winkel miteinander verrechnet werden. Dazu wird zunächst der Konvergenzwinkel γ vor der Kopfdrehung über den Tangens mit Formel 2.26 berechnet.

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\frac{PD_F}{2}}{a + e_Z}\right) \quad (2.26)$$

Mit dem Winkel γ lässt sich nun mit Formel 2.27 der monokulare Inset auf Brillenglasebene berechnen.

$$Inset = \tan(\gamma) * (e + e_Z) \quad (2.27)$$

Die monokulare Nah-PD errechnet sich bekanntermaßen mit Formel 2.28.

$$PD_N = PD_F - Inset \quad (2.28)$$

Wird für den Inset Formel 2.27 eingesetzt, ergibt sich Formel 2.29.

$$PD_N = PD_F - \tan(\gamma) * (e + e_Z) \quad (2.29)$$

Bei Betrachtung von Abbildung 46 wird deutlich, dass beim kopfdrehungs-äußeren Auge der Winkel β addiert werden muss. Jenes muss nicht mehr so stark konvergieren. Daraus ergibt sich zur Korrektur der monokularen Nah-PD des kopfdrehungs-äußeren Auges Formel 2.30.

$$PD_{N_außen_neu} = PD_{F_außen} - [\tan(\gamma + \beta) * (e + e_Z)] \quad (2.30)$$

Beim kopfdrehungs-inneren Auge muss der Winkel β subtrahiert werden. Dieses Auge muss etwas mehr Konvergenz aufbringen. Daraus folgert Formel 2.31.

$$PD_{N_innen_neu} = PD_{F_innen} - [\tan(\gamma - \beta) * (e + e_Z)] \quad (2.31)$$

Streng genommen ändern sich bei einer Kopfdrehung auch die binokularen Pupillendistanzen, sowohl in der Ferne als auch in der Nähe. Dies ließe sich recht unkompliziert über den Kosinus des Kopfdrehungswinkels berechnen, jedoch ist dessen korrekte Ermittlung mittels verwendetem Messwerkzeug etwas unpräzise. Außerdem werden die Köpfe bei den Untersuchungen an der KSS gezielt so ausgerichtet, dass bei den Messungen möglichst keine gedrehte Kopfhaltung vorliegt. Deshalb wird dieser potenziell auftretende Fehler in dieser Arbeit zunächst vernachlässigt.

Da Theorie und Praxis allerdings oftmals zweierlei sind, treten auch hier gewisse Problematiken auf. Zum einen gestaltet es sich schwierig, den Messaufsatz nur durch Augenmaß exakt mittig auf der Brillenfassung anzubringen, sodass die vertikale Mittellinie der Skala nicht genau mit der Mitte des Fassungsstegs übereinstimmt. Dies wird in Abbildung 47 deutlich. Es ist erkennbar, dass zwischen der Verlängerung der Stegmitte und der vertikalen Mittellinie der Skala ein seitlicher Versatz besteht.

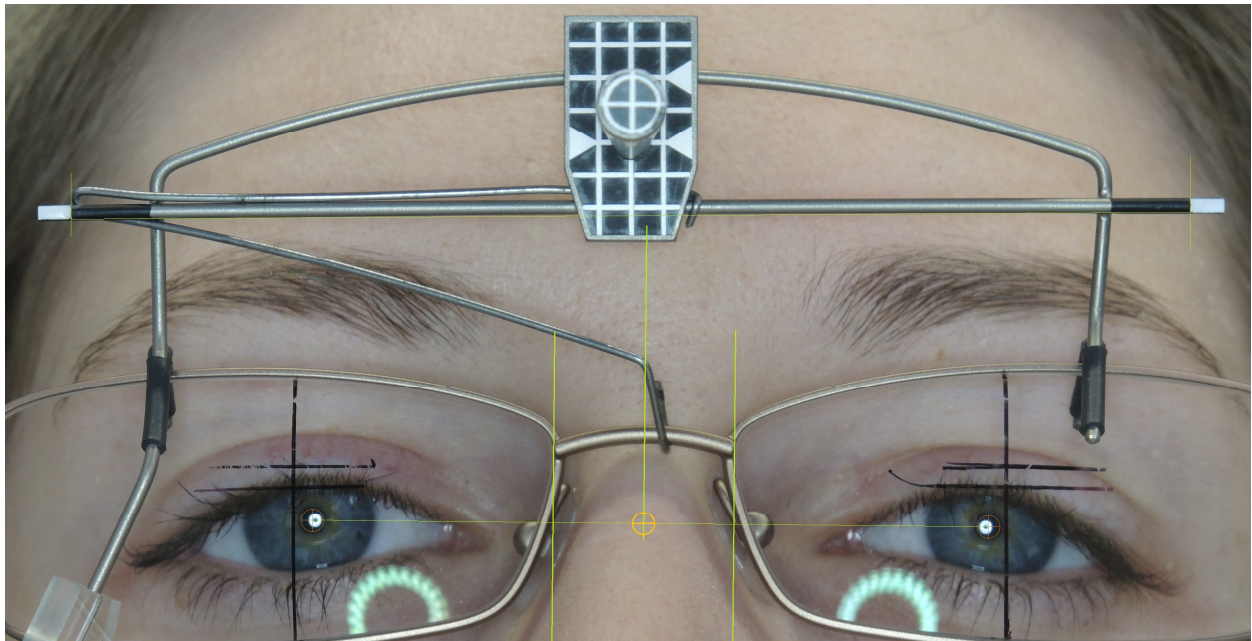


Abbildung 47 Seitlicher Versatz des Messaufsatzes zur Fassungsmitte

Dadurch kann der berechnete Kopfdrehungswinkel β nicht korrekt sein, wodurch die anschließende Korrekturrechnung der monokularen Pupillendistanzen ebenfalls fehlerbehaftet ist.

Desweiteren liegt das Kreuz des Dorns perspektivisch teilweise nicht vor der dahinterliegenden Skala, wodurch ein Ablesen dieser gänzlich unmöglich wird. Bei diesen Messungen kann der Winkel β gar nicht berechnet werden. Selbst wenn ein Ablesen der Skala gerade noch möglich wäre, besteht bei einer sehr schrägen Abbildung des Dorns ein weiteres perspektivisches Problem. Dadurch kann bei der Berechnung des Winkels β nicht mehr von seiner tatsächlichen Länge von 33 mm ausgegangen werden. Dies ist in Abbildung 48 gut erkennbar.

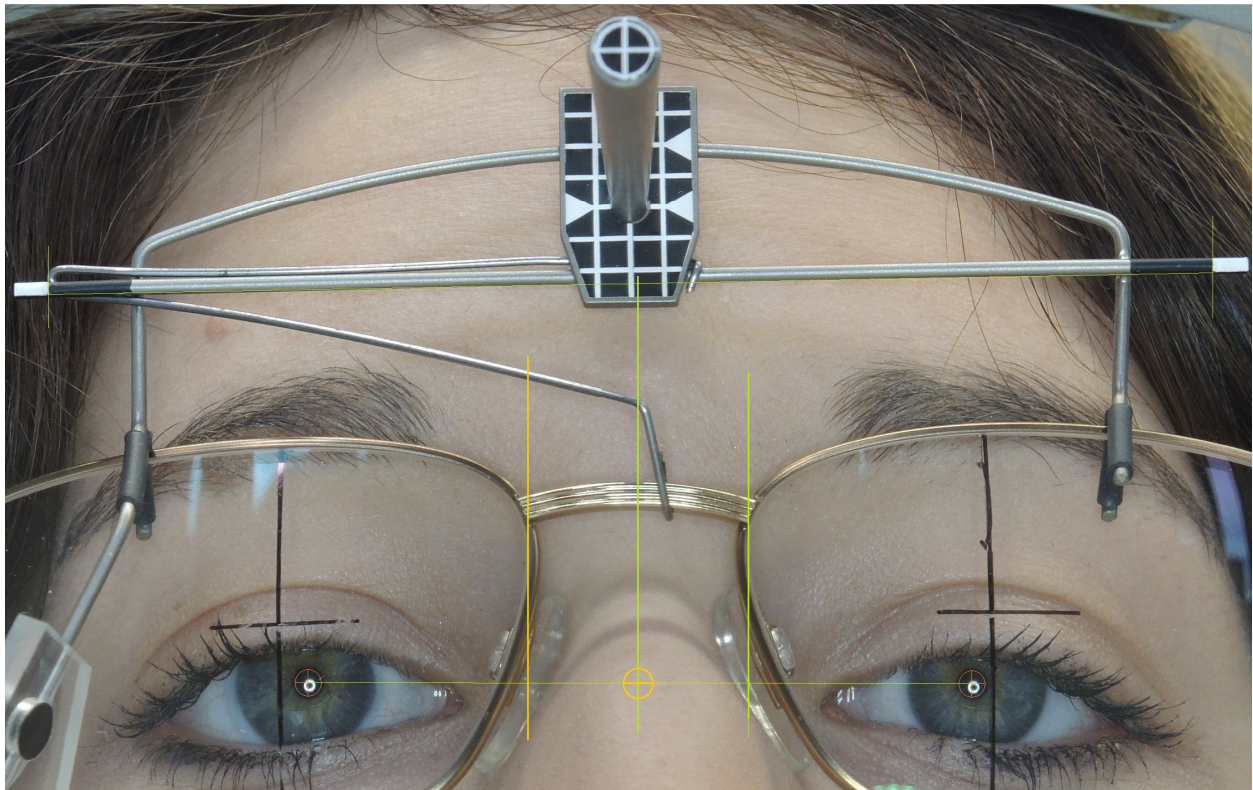


Abbildung 48 Kreuz und Skala des Messaufsatzes liegen perspektivisch nicht übereinander

Ein weiteres, bereits angesprochenes Problem bei der Beurteilung der monokularen Pupillendistanzen ist die Frage, was als Referenzpunkt herangezogen wird, um diese abzutragen. Hierfür wird die Stegmitte herangezogen. Allerdings sind bei dieser Vorgehensweise die monokularen Pupillendistanzen von vornherein inkorrekt, falls die Brille trotz gewissenhafter Anpassung nicht exakt mittig auf der Nase sitzt. Dies ist beispielsweise in Abbildung 47 erkennbar. Bei genauem Betrachten wird sichtbar, dass der Fassungsrand links (Ansicht von vorne) einen größeren Abstand zum Nasenrücken aufweist als der rechte.

Abschließend stellt sich die Frage, ob Aufsatz und Fassung nicht bereits von vornherein - trotz noch so sorgfältiger Ausrichtung - nicht parallel vor den Augen sitzen. Dies ist in Abbildung 49 überspitzt dargestellt. Wird der unter diesem Umstand ermittelte Winkel β zur Korrektur der monokularen Pupillendistanzen herangezogen, sind auch diese mit einem entsprechenden Fehler behaftet.

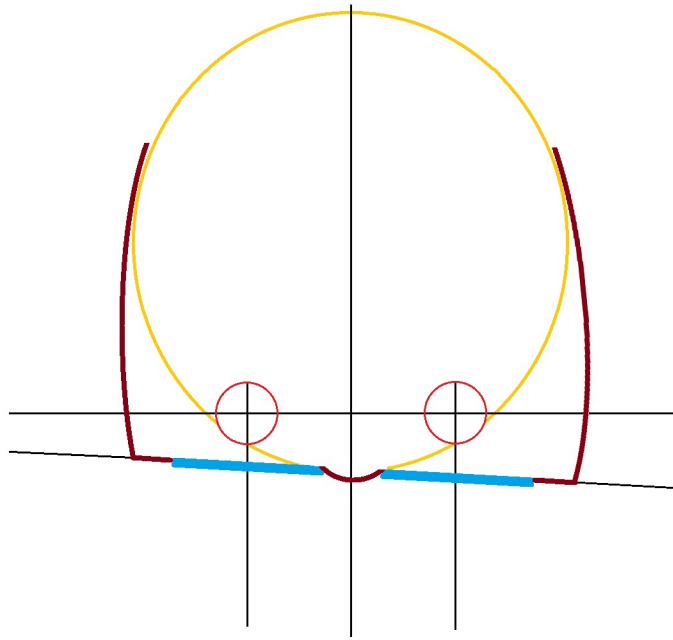


Abbildung 49 Darstellung einer nicht parallel vor den Augen sitzenden Brillenfassung

Es wird ersichtlich, dass die exakte Bestimmung der monokularen Pupillendistanzen, insbesondere derjenigen für die Nähe, mit einigen Schwierigkeiten verbunden ist. Da es sich bei den Probanden nicht um statische Systeme handelt, ist selbst unter Verwendung einer Kinn- und Stirnstütze eine exakt gerade, unverdrehte Kopfhaltung vor der Kamera nicht zu gewährleisten. Ebenso wird deutlich, dass die monokularen Pupillendistanzen bei ihrer Messung durch etliche einfließende Faktoren sehr fehleranfällig sind.

Aufgrund dieser grundsätzlichen Problematik wird darauf in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, sondern *beim finalen Vergleich* zwischen Fern- und Nahfixation lediglich die Gesamt-PD berücksichtigt. Diese bleibt durch oben beschriebene Faktoren nahezu unbeeinflusst, da sich als Referenzpunkt stets auf die Pupillenmitte des Partnerauges bezogen wird, anstatt auf einen „beliebig/ungenau“ festgelegten Referenzpunkt irgendwo im Bereich der Nasenmitte. Daraus resultierend wird beim finalen Vergleich entsprechend der Gesamtinset betrachtet. Die monokularen Pupillendistanzen und Insets werden dennoch gemessen und tabellarisch dargestellt, jedoch werden sie nicht beurteilt.

2.3.3 Korrektur des perspektivischen Fehlers

Wie in Kapitel 2.3.1 erklärt, wird über den Referenzsteg des Messaufsatzes ein Umrechnungsfaktor in dessen Bildebene ermittelt. Abbildung 50 zeigt, dass die Augen allerdings nicht in derselben Bildebene, sondern in einer tieferen Ebene im Bild liegen. Daher ist die aus den Fotos umgerechnete PD zu klein.

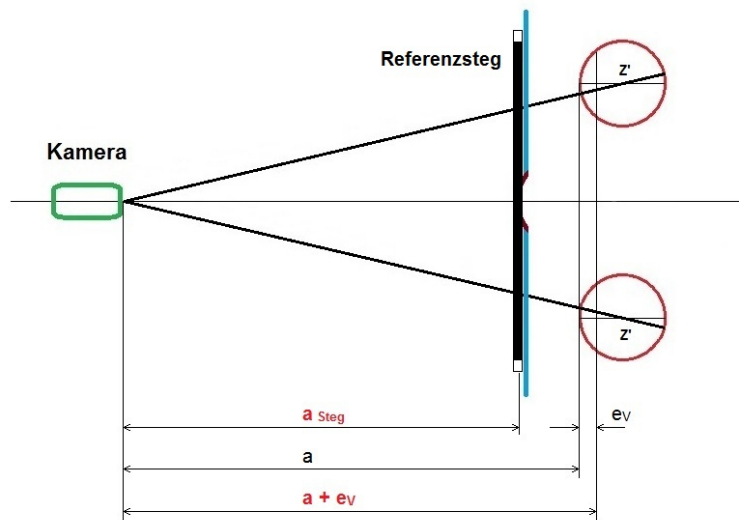


Abbildung 50 Schematische Darstellung der Distanz zwischen Kamera und Referenzsteg bzw. Kamera und Augen

Es gilt also, die Strecken Kamera-Referenzsteg und Kamera-Iris zu berücksichtigen. Zur Korrektur des Fehlers wird die ermittelte PD mit dem Streckenverhältnis als Umrechnungsfaktor multipliziert. An dieser Stelle tritt eine gewisse Schwierigkeit auf: Die Strecke zwischen Referenzsteg und Kamera ist nicht bekannt. Jene variiert auch, je nachdem, aus welchem Winkel die Kameramessung durchgeführt wird. Dies veranschaulicht Abbildung 51. Bei gerader Messung ist die Streckendifferenz größer als bei einer Messung aus einer tieferen Perspektive. Desweiteren sitzt der Messaufsatz bei jedem Probanden je nach Fassungsmaßen höher oder tiefer zu den Augen.

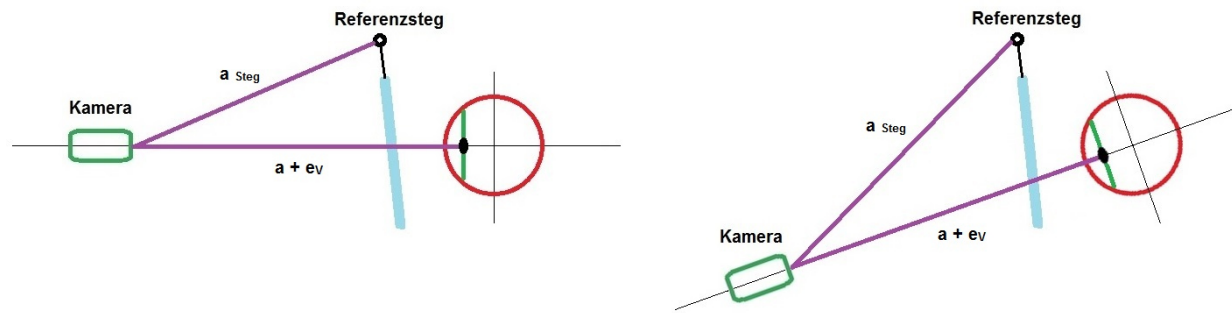


Abbildung 51 Streckenverhältnis zwischen Kamera und Referenzsteg bzw. Kamera und Auge in Abhängigkeit vom Messwinkel.

Als pragmatische Lösung wird für die Korrektur angenommen, dass sich der Referenzsteg bei jedem Probanden um den jeweiligen HSA näher an der Kamera befindet. Daraus lässt sich die aus den Bildern ermittelte PD nach Formel 2.32 korrigieren.

$$PD_{N_Iris} = PD_{N_Foto} * \frac{a + e_V}{a_{Steg}} \quad (2.32)$$

mit $e_V = 3,52mm$

$$a_{Steg} = (a + e_V) - e$$

2.3.4 Formel zur Korrektur des gemessenen PD-Insets

Zur Erstellung dieser Formel sind lediglich zwei grundsätzliche Erkenntnisse aus der Messung der Nah-PD mittels Kamera essentiell. Zum einen sieht der Untersucher bei der Auswertung der entstandenen Fotos nicht die tatsächlichen Durchblickspunkte auf Brillenglasebene, sondern die Position der Pupillen hinter den Brillengläsern auf Irisblattebene. Zum anderen ist die aus den Fotos ausgewertete Nah-PD noch mit einem perspektivischen Fehler behaftet, da sich die Referenzstrecke des Messaufsatzes zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors (Pixel zu Millimeter) in einer näheren Bildebene zur Kamera befindet als die Iris.

Im Prinzip wird also der perspektivisch korrigierte PD-Inset über den Strahlensatz auf die Brillenglasebene umgerechnet. Das Streckenverhältnis des Systems Brillenglas-Auge beschreibt allgemein Formel 2.33

$$\frac{Inset}{e + e_Z} = \frac{PD_Inset}{e_Z - e_V} \quad (2.33)$$

Der PD_Inset ergibt sich aus der Differenz zwischen der Fern-PD und der Nah-PD auf Irisblattebene. Hierzu wird die aus den Fotos ermittelte Nah-PD durch Multiplikation mit dem Streckenverhältnis aus Kamera-Auge und Kamera-Referenzsteg perspektivisch korrigiert. Dies lässt sich durch Formel 2.34 beschreiben.

$$PD_Inset_{korrr} = PD_F - PD_{N_Foto} * \frac{a + e_V}{(a + e_V) - e} \quad (2.34)$$

Wird der Ausdruck für PD_Inset_{korrr} nun in Formel 2.34 für PD_Inset eingesetzt und jene gleichzeitig nach dem Brillenglas-Inset $Inset$ umgestellt, resultiert die endgültige Formel zur Korrektur des mittels Kamera gemessenen PD-Insets (Formel 2.35).

$$Inset = (e + e_Z) * \frac{PD_F - PD_{N_Foto} * \frac{a + e_V}{(a + e_V) - e}}{e_Z - e_V} \quad (2.35)$$

mit $e_Z = 13,5mm - 0,2 * \frac{S_{\ddot{A}}}{dpt}$

$$e_V = 3,52mm$$

Für die Korrektur des gemessenen PD-Insets muss die Berechnung mit obiger Formel für jedes Auge separat erfolgen.

In dieser Arbeit werden für alle Messungen Plangläser verwendet, daher gilt diese Formel zunächst nur für Messungen an Brillen ohne dioptrischer Wirkung. Prinzipiell könnte die Messung auch komplett ohne Brille durchgeführt werden, jedoch entfielen dann aufgrund des fehlenden Fassungsstegs der fixe Referenzpunkt zur Abtragung der monokularen Pupillendistanzen und es müsste nach einer Lösung gesucht werden, wie sich der Messaufsatz mit Referenzsteg in einer definierten Entfernung zu den Augen am Kopf befestigen lässt.

3 Messungen und Auswertungen

Im Folgenden wird auf die Auswertung der gesammelten Messergebnisse sowie deren Berechnung etwas genauer eingegangen. Da das Ziel der Arbeit die Entwicklung einer direkten Messmethode mittels *Kamera* ist, wird auf diese Messergebnisse besonderes Augenmerk gelegt. Ergebnisse aus Messungen ohne Kamera dienen lediglich zum Vergleich. Abbildung 52 zeigt eine Übersicht der folgenden Auswertungen und wird in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben.

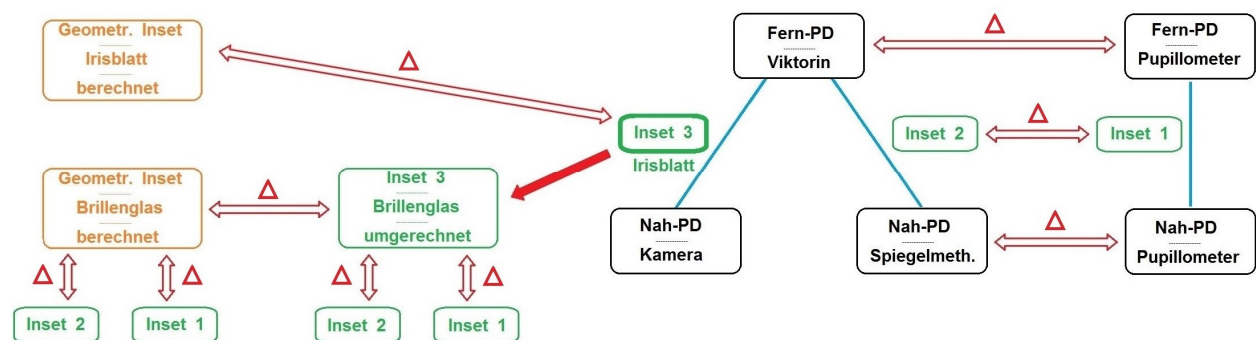


Abbildung 52 Übersicht über die Auswertungen

Für die Kameramessungen werden die *perspektivisch korrigierten Pupillendistanzen und PD-Insets* betrachtet und für weitere Berechnungen herangezogen. Die Rohdaten aus den Fotos sind in den Tabellen blau hinterlegt, die korrigierten Daten sind *grün hinterlegt*.

3.1 Probandendaten

Die eingangs durchgeführten Messungen der individuellen Parameter wie Führungsauge, Fernpunktrefraktion, HSA, VN und FSW sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Fernpunktrefraktion wird mittels Scheitelbrechwertmesser aus der probanden-eigenen Brille ausgemessen. Die jeweilige vorliegende Fehlsichtigkeit wird bei den anschließenden Messungen durch weiche Kontaktlinsen korrigiert. Bei Proband 4 handelt es sich um den Kunstkopf, daher weist die Tabelle in dieser Zeile einige verständliche Lücken auf.

Tabelle 3 Eingangs ermittelte Probandendaten und Individualparameter

Proband	Alter [Jahre]	Führungsauge motorisch sensorisch		Fernpunktrefraktion						HSA [mm]	VN [°]	FSW [°]
				Rechts sph [dpt] cyl [dpt]			Links A [°]					
1	23	R	R	-1,00	-1,00	105°	-1,25	-0,50	75°	11	1	7
2	25	R	R	-5,00			-4,00	-1,75	175°	13	8	6
3	25	R	R	-0,75	-0,25	165°	-1,25	-0,25	5°	14	3	6
4	--	--	--	--			--			10	22	7

3.2 Messungen ohne Kamera

Im Folgenden werden die Unterschiede der Werte mittels t-Test für abhängige Stichproben auf Signifikanz geprüft. Die Nullhypothese besagt, die mittlere Differenz der Messwerte ist Null, das heißt die Werte unterscheiden sich nicht. Dies ist gegeben, falls $t < t_{df; \alpha}$ ist. Falls $t > t_{df; \alpha}$ ist, wird die Nullhypothese abgelehnt, das heißt die Werte unterscheiden sich signifikant. Alle Werte werden auf dem 5%-Signifikanzniveau geprüft; der kritische t-Wert wird entsprechend der Freiheitsgrade $n-1$ der t-Tabelle für zweiseitige Fragestellungen entnommen. Die Auswertung erfolgt mittels Excel.

3.2.1 Messung der Fern-PD (Pupillometer)

Die Pupillendistanzen für die Ferne werden zunächst in zehn aufeinanderfolgenden Messungen mit dem Pupillometer für jeden Probanden ermittelt. Über diese Werte wird anschließend der arithmetische Mittelwert gebildet. Die mittleren Pupillendistanzen (Ferne) werden daraufhin auf die Brillengläser aufgezeichnet und nach der Viktorin-Methode abgeglichen. Die endgültig abgeglichenen Pupillendistanzen bilden den Ausgangswert für alle folgenden Insetberechnungen. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Pupillendistanzen für die Ferne - gemittelt aus zehn Pupillometermessungen je Proband sowie abgeglichen nach Viktorin. Im rechten Tabellenbereich sind die Differenzen zwischen beiden Messungen dargestellt

Proband		PD Ferne (Pupillometer)			PD Ferne (Viktorin)			Differenz (Viktorin-Pupillometer)		
		Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	MW SD	30,60 0,21	28,85 0,24	59,45 0,37	30,50	29,50	60,00	-0,10	0,65	0,55
2	MW SD	30,95 0,16	32,55 0,28	63,50 0,33	31,50	32,50	64,00	0,55	-0,05	0,50
3	MW SD	32,35 0,24	30,05 0,28	62,40 0,32	32,00	31,00	63,00	-0,35	0,95	0,60
4	MW SD	34,35 0,24	34,00 0,00	68,35 0,24	34,50	34,00	68,50	0,15	0,00	0,15

Bei genauer Betrachtung der Werte wird deutlich, dass über die zehn Pupillometermessungen gewisse Schwankungsbreiten auftreten. Dies liegt hauptsächlich daran, dass das verwendete Gerät nur in 0,50 mm-Abstufungen genau misst. So kommt es vor, dass die einzelnen Messwerte um ebendiese Messungenauigkeit schwanken, was in der Summe zu vorliegenden Standardabweichungen führt. Zum Vergleich der Werte werden die Differenzen betrachtet. Hierzu werden die Pupillometerwerte von den Viktorinwerten subtrahiert. Die *negativen Vorzeichen* zeigen, dass für die betroffenen Werte die nach Viktorin abgeglichene PD kleiner ist als die mittels Pupillometer gemessene PD. Hier werden bereits kleine Unterschiede sichtbar. Bei allen Probanden einschließlich Kunstkopf ist die Gesamt-PD nach dem Abgleich etwas größer. Zudem fällt auf, dass der Unterschied zwischen Pupillometerwerten und Viktorinwerten bei den Messungen am Kunstkopf am geringsten ist. Hier sind die Werte nahezu identisch, was darauf zurückzuführen ist, dass der Kunstkopf im Gegensatz zu den drei Probanden keine Augenbewegungen durchführt.

Nach dem t-Test unterscheiden sich die Werte nach Pupillometer und Viktorin signifikant auf dem 5%-Niveau ($t = 5,091$; $t_{3; 0,05} = 3,182$).

Durch eine grafische Darstellung lassen sich die Differenzen zwischen beiden Methoden etwas besser veranschaulichen. In Abbildung 53 sind die binokularen Pupillendistanzen der gemittelten Pupillometerwerte (blau) und diejenigen nach

Viktorin-Abgleich (orange) für jeden Probanden dargestellt. Hier wird deutlich, wie stark die Werte voneinander abweichen.

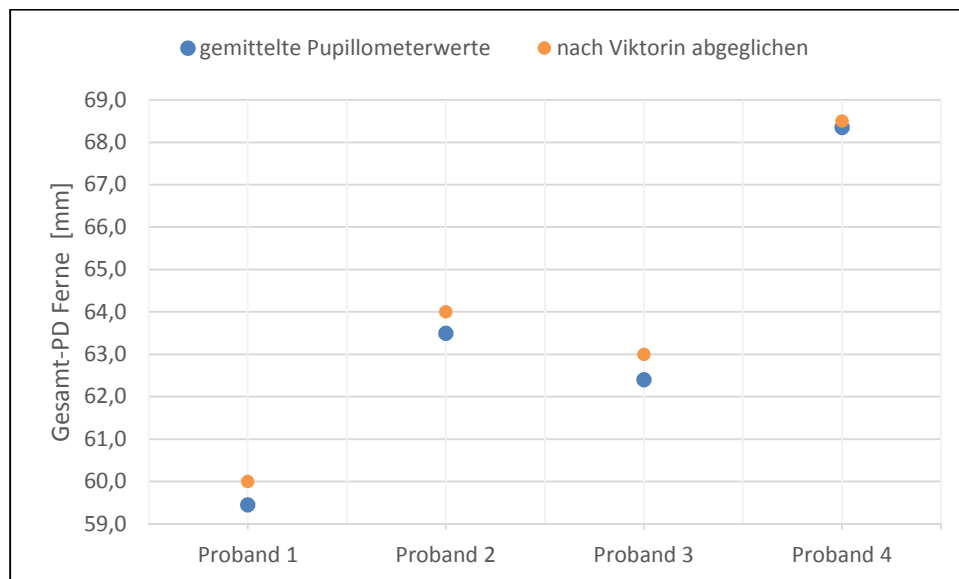


Abbildung 53 Grafische Darstellung der binokularen Pupillendistanzen (Ferne) für jeden Probanden nach reinen Pupillometerwerten und nach Viktorinabgleich

3.2.2 Messung der Nah-PD (Pupillometer)

Zusätzlich werden mittels Pupillometer die Pupillendistanzen für die Nähe gemessen. Dazu wird das Einstellrad auf dem Gerät auf 0.40 m Distanz eingestellt. Als Ausgangswert für die Berechnung des Insets wird hier das einzige Mal die Fern-PD aus den gemittelten Pupillometermessungen herangezogen. Dadurch lässt sich ein reiner „Pupillometer-Inset“ betrachten, welcher nicht durch den Viktorin-Abgleich beeinflusst ist. Diese Werte sind in Tabelle 5 dargestellt. Auch beim Kunstkopf lassen sich eine Nah-PD und damit ein Inset ermitteln. Jener darf aufgrund der fehlenden Konvergenz aber eigentlich nicht vorliegen und sollte 0,00 mm betragen.

Tabelle 5 Pupillendistanzen für Ferne und Nähe gemessen mittels Pupillometer. Im rechten Tabellenbereich ist der jeweilige resultierende Inset dargestellt

Proband		PD Ferne (Pupillometer)			PD Nähe (Pupillometer)			Inset (Pupillometer)		
		Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	MW	30,60	28,85	59,45	29,05	27,40	56,45	1,55	1,45	3,00
	SD	0,21	0,24	0,37	0,16	0,32	0,37			
2	MW	30,95	32,55	63,50	29,30	30,80	60,10	1,65	1,75	3,40
	SD	0,16	0,28	0,33	0,26	0,26	0,39			
3	MW	32,35	30,05	62,40	30,60	28,20	58,80	1,75	1,85	3,60
	SD	0,24	0,28	0,32	0,32	0,26	0,26			
4	MW	34,35	34,00	68,35	33,50	32,60	66,10	0,85	1,40	2,25
	SD	0,24	0,00	0,24	0,00	0,21	0,21			

Auf welche Ebene (Berücksichtigung des HSA) sich die Pupillendistanzen und der resultierende Inset beziehen, kann nicht genau gesagt werden, da das Innenleben des Pupillometers nicht untersucht wurde. Aller Wahrscheinlichkeit nach beziehen sich die Werte auf die Scheibenebene des Pupillometers, innerhalb welcher die schwarzen Linien deckungsgleich auf die Pupillenmitte verschoben werden.

3.2.3 Messung der Nah-PD (Spiegelmethode)

Daneben wird die Nah-PD mittels Spiegelmethode gemessen. Dies geschieht über Kreuz. Untersucher und Proband halten dabei den gleichen Abstand zur Fixationsmarke ein. Die Pupillenpositionen des jeweiligen Probanden werden direkt auf den Brillengläsern markiert. Jene ist die theoretisch korrekte Nah-PD auf Brillenglasebene. Als Ausgangswert für die Berechnung des Insets wird die nach Viktorin abgegliche Fern-PD herangezogen. Somit wird ein Inset erhalten, der aus individuell abgeglichenen Werten durch den Untersucher ermittelt wird. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6 Fern-PD abgeglichen nach Viktorin und Nah-PD ermittelt durch Spiegelmethode über Kreuz. Im rechten Tabellenbereich ist der jeweilige daraus resultierende Inset dargestellt

Proband	PD Ferne (Viktorin)			PD Nähe (Spiegelmethode)			Inset (Spiegelmethode)		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	30,50	29,50	60,00	29,00	27,50	56,50	1,50	2,00	3,50
2	31,50	32,50	64,00	29,00	31,00	60,00	2,50	1,50	4,00
3	32,00	31,00	63,00	30,00	29,00	59,00	2,00	2,00	4,00
4	34,50	34,00	68,50	33,00	32,50	65,50	1,50	1,50	3,00

Auch beim Vergleich dieser Ergebnisse zeigt sich beim Kunstkopf der kleinste Inset aufgrund der fehlenden Konvergenz.

Vergleich Nah-PDs (Pupillometer und Spiegelmethode)

Die Pupillendistanzen (Nähe) aus den gemittelten Pupillometerwerten und den Werten der Spiegelmethode werden in Tabelle 7 verglichen. Hierzu werden die Pupillometerwerte von denen der Spiegelmethode subtrahiert. Die negativen Vorzeichen zeigen, dass die nach Spiegelmethode gemessene Nah-PD an dieser Stelle kleiner ist als die mittels Pupillometer gemessene Nah-PD. Beim Vergleich der Differenzen in der Gesamt-Nah-PD zeigt sich beim Kunstkopf der größte Unterschied zwischen beiden Messungen.

Die Werte nach Pupillometer und Spiegelmethode unterscheiden sich nach dem t-Test auf dem 5%-Niveau nicht signifikant voneinander ($t = 0,748$; $t_{3; 0,05} = 3,182$).

Tabelle 7 Pupillendistanzen für die Nähe - gemittelt aus zehn Pupillometermessungen je Proband sowie ermittelt durch Spiegelmethode über Kreuz. Im rechten Tabellenbereich sind die Differenzen zwischen beiden Messungen dargestellt

Proband	PD Nähe (Pupillometer)			PD Nähe (Spiegelmethode)			Differenz (Spiegelmethode - Pupillometer)		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	29,05	27,40	56,45	29,00	27,50	56,50	-0,05	0,10	0,05
2	29,30	30,80	60,10	29,00	31,00	60,00	-0,30	0,20	-0,10
3	30,60	28,20	58,80	30,00	29,00	59,00	-0,60	0,80	0,20
4	33,50	32,60	66,10	33,00	32,50	65,50	-0,50	-0,10	-0,60

Die Werte der binokularen Pupillendistanzen (Nähe) sind in Abbildung 54 grafisch dargestellt. Es wird deutlich, dass bei den ersten drei Probanden nahezu kein Unterschied zwischen den gemittelten Messungen mittels Pupillometer (blau) und den Messungen nach Spiegelmethode (orange) besteht.

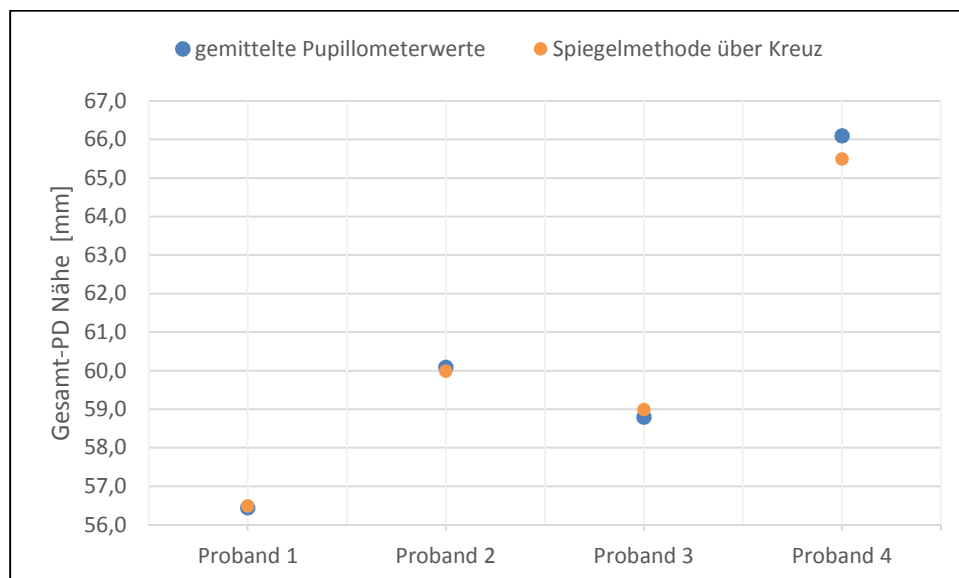


Abbildung 54 Grafische Darstellung der binokularen Pupillendistanzen (Nähe) für jeden Probanden nach gemittelten Pupillometermessungen und Spiegelmethode

Vergleich der Insets (Pupillometer und Spiegelmethode)

Die bisher ermittelten Insets sind in Tabelle 8 gegenübergestellt. Im linken Tabellenbereich steht der reine „Pupillometer-Inset“, im mittleren Tabellenbereich steht der durch Viktorin und Spiegelmethode ermittelte Inset. Im rechten Tabellenbereich finden sich die Differenzen zwischen den Insets beider Messmethoden. Hierzu wird der „Pupillometer-Inset“ vom Inset aus Viktorin und Spiegelmethode subtrahiert. Bei Betrachtung der Gesamtdifferenzen ist erkennbar, dass alle Werte positiv sind, das heißt, der „Pupillometer-Inset“ ist binokular bei allen Probanden der kleinere.

Tabelle 8 Vergleich der Insets aus reinen Pupillometerwerten (links) und den Viktorin- und Spiegelmethoden-Werten (Mitte). Die Differenzen sind im rechten Tabellenbereich dargestellt.

Proband	Inset (Pupillometer)			Inset (Spiegelmethode)			Differenz (Spiegelmethode - Pupillometer)		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	1,55	1,45	3,00	1,50	2,00	3,50	-0,05	0,55	0,50
2	1,65	1,75	3,40	2,50	1,50	4,00	0,85	-0,25	0,60
3	1,75	1,85	3,60	2,00	2,00	4,00	0,25	0,15	0,40
4	0,85	1,40	2,25	1,50	1,50	3,00	0,65	0,10	0,75

Der Unterschied dieser Werte ist signifikant ($t = 8,701$; $t_{3; 0,05} = 3,182$). An dieser Stelle kommt nicht zuletzt auch zum tragen, dass die binokulare Fern-PD nach Viktorinabgleich bereits bei allen Probanden größer ist, als die mittels Pupillometer gemessene Fern-PD (vgl. Tabelle 4).

In Abbildung 55 wird ersichtlich, dass bei jedem Probanden ein gewisser Unterschied zwischen dem binokularen „Pupillometer-Inset“ und dem binokularen Inset aus Viktorin und Spiegelmethode besteht. Bei Probanden 1-3 liegt die Ursache größtenteils in den Unterschieden der Pupillendistanzen für die Ferne, da jene für die Nähe nahezu identisch sind, und bei Proband 4 liegt die Ursache größtenteils in dem Unterschied der Pupillendistanzen für die Nähe, da jene für die Ferne nahezu identisch sind.

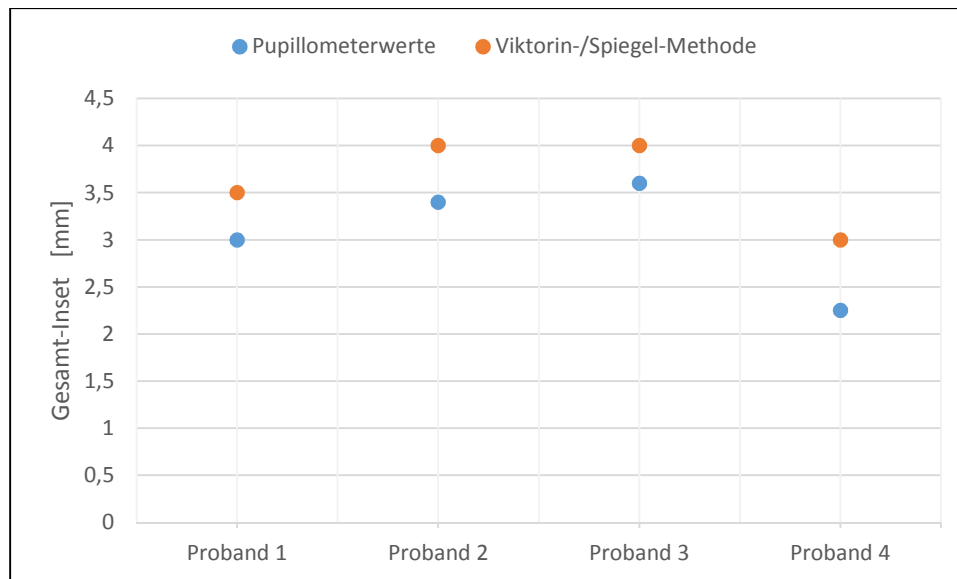


Abbildung 55 Darstellung der Insets nach reinen gemittelten Pupillometerwerten und nach Viktorin und Spiegelmethode

3.3 Messungen mit Kamera

In den folgenden Auswertungen wird bei allen ausgewerteten Pupillendistanzen, wie in Kapitel 2.3.3 erläutert, der perspektivische Fehler korrigiert. Die korrigierten Pupillendistanzen dienen zur weiteren Berechnung des Insets.

3.3.1 Messungen der Nah-PD (Direkte Kameramessung)

Bei diesen Messungen fixieren die Probanden die Fixationsmarke direkt am Kameraobjektiv, wobei je Messreihe zehn Fotos erstellt werden. Die Prüferentfernung beträgt dabei 400 mm. Alle Messungen werden bei statischer Kopfhaltung mittels KSS durchgeführt. Hierbei wird theoretisch die Nah-PD auf Irisblattebene gemessen, da auf den Fotos die Pupillen der Probanden gesehen werden, jedoch nicht der tatsächliche Durchblickspunkt auf Brillenglasebene.

Die zehn ausgewerteten Pupillendistanzen werden wie bisher gemittelt, perspektivisch korrigiert (Formel 2.32) und für jeden Probanden von der Fern-PD nach Viktorin subtrahiert. Der Mittelwert über die Standardabweichungen der direkt ausgewerteten, unkorrigierten Pupillendistanzen beträgt 0,04 mm. Hinsichtlich

der Auflösung eines Pixels in der Abbildung von 0,0364 mm lässt dies auf eine passable Messgenauigkeit schließen. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9 Berechnete PD-Insets bei direkter Fixation der Marke vor dem Objektiv bei unveränderter VN

Proband		PD Ferne (Viktorin)			PD Nähe (Kamera direkt)			PD Nähe (Kamera direkt) perspektivisch korrigiert			PD-Inset (Kamera direkt) perspektivisch korrigiert		
					Unveränderte VN			Unveränderte VN			Unveränderte VN		
		Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	MW SD	30,50	29,50	60,00	28,30 0,07	28,77 0,08	57,09 0,06	29,09	29,58	58,69	1,41	-0,08	1,31
2	MW SD	31,50	32,50	64,00	29,57 0,10	30,79 0,10	60,36 0,03	30,55	31,82	62,37	0,95	0,68	1,63
3	MW SD	32,00	31,00	63,00	29,62 0,06	29,71 0,05	59,33 0,04	30,69	30,78	61,47	1,31	0,22	1,53
4	MW SD	34,50	34,00	68,50	33,05 0,02	32,36 0,02	65,41 0,02	33,88	33,19	67,07	0,62	0,81	1,43

Es fällt auf, dass der PD-Inset beim Kunstkopf verhältnismäßig groß ist, obwohl jener keine Konvergenz besitzt. Demnach müssen dafür andere Ursachen zugrunde liegen, welche in Kapitel 5 (Diskussion) genauer erörtert werden.

3.3.2 Kameramessung verschiedener Distanzen am Kunstkopf

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit der Kamera werden weitere Messreihen am Kunstkopf in 400 mm, 500 mm und 600 mm durchgeführt. Der Ablauf je Messreihe ist identisch zu oben beschriebenen. Im Grunde sollte bei der Auswertung der Fotos am Kunstkopf immer die tatsächlich eingearbeitete Pupillendistanz ermittelt werden, da schließlich keine Konvergenz vorliegt. Bei Betrachtung der bisherigen Ergebnisse findet sich jedoch auch beim Kunstkopf stets ein Inset. Das lässt bereits darauf schließen, dass ein Zusammenhang mit der Messentfernung zugrunde liegen muss. Daher werden drei Messreihen von je zehn Fotos in verschiedenen Distanzen durchgeführt, um jenen Zusammenhang beschreiben zu können und für die jeweilige Prüferentfernung Korrekturfaktoren abzuleiten. Die Ergebnisse aus den drei Messreihen sind in Tabelle 10 dargestellt. Bei Betrachtung

der unkorrigierten Pupillendistanzen wird bereits deutlich, dass jene mit zunehmender Messentfernung größer werden. Nach Korrektur des perspektivischen Fehlers über die jeweilige Messdistanz sind sie schließlich fast identisch.

Tabelle 10 Berechnete PD-Insets bei verschiedenen Messentfernungen

Proband 4	PD Ferne (Viktorin)			PD Nähe (Kamera direkt)			PD Nähe (Kamera direkt) perspektivisch korrigiert			PD-Inset (Kamera direkt) perspektivisch korrigiert		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
MW SD	Entfernung 400 mm											
	34,50	34,00	68,50	33,05 0,02	32,36 0,02	65,41 0,02	33,88	33,19	67,07	0,62	0,81	1,43
MW SD	Entfernung 500 mm											
	34,50	34,00	68,50	33,16 0,01	32,60 0,02	65,76 0,03	33,83	33,26	67,09	0,67	0,74	1,41
MW SD	Entfernung 600 mm											
	34,50	34,00	68,50	33,24 0,02	32,93 0,02	66,16 0,03	33,71	33,40	67,11	0,79	0,60	1,39
MW	Entfernung 10000 mm hypothetisch											
	--	--	68,50	--	--	68,43	--	--	68,50	--	--	0,00

Werden lediglich die drei gemessenen Ergebnisse betrachtet, kommt der Verdacht auf, es bestünde ein linearer Zusammenhang zwischen Messentfernung und gemessener PD. Theoretisch sollte die messbare Pupillendistanz durch die tatsächlich eingearbeitete PD des Kunstkopfes nach oben limitiert sein. Das heißt, die Funktion müsste sich mit zunehmender Messentfernung asymptotisch an diesen Grenzwert annähern. Bei diesem Grenzwert der maximal messbaren PD beträgt der PD-Inset 0,00 mm. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass sich die PD-Insetfunktion asymptotisch an den Grenzwert 0,00 mm annähern sollte. Allerdings besitzt das Objektiv auch eine gewisse Verzeichnung, wodurch der PD-Inset auch gegen einen anderen Wert als 0,00 mm konvergieren könnte oder immer größer oder kleiner werden könnte. Da die Verzeichnung des Objektivs in dieser Arbeit jedoch nicht untersucht wird, wird zunächst davon ausgegangen, dass die PD-Insetfunktion gegen 0,00 mm konvergiert. Die PD-Insetkurve ist in Abbildung 56 näherungsweise dargestellt.

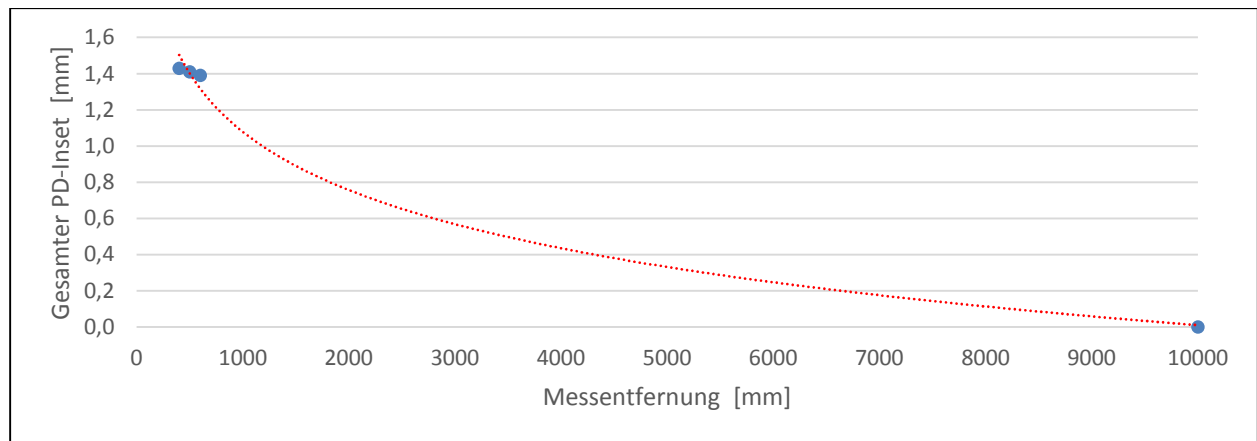


Abbildung 56 Darstellung der PD-Insets bei direkter Kameramessung am Kunstkopf bei verschiedenen Messentfernungen. Ein hypothetischer Messpunkt bei 10 Metern Prüfdistanz soll zeigen, dass kein linearer Zusammenhang bestehen kann

Werden lediglich die drei gemessenen Werte betrachtet, besteht in diesem Distanzbereich dennoch ein scheinbar linearer Zusammenhang, welcher allerdings auch durch Zufall entstanden sein kann. Dieser wird in Abbildung 57 durch Darstellung der gemessenen PD-Insets deutlich.

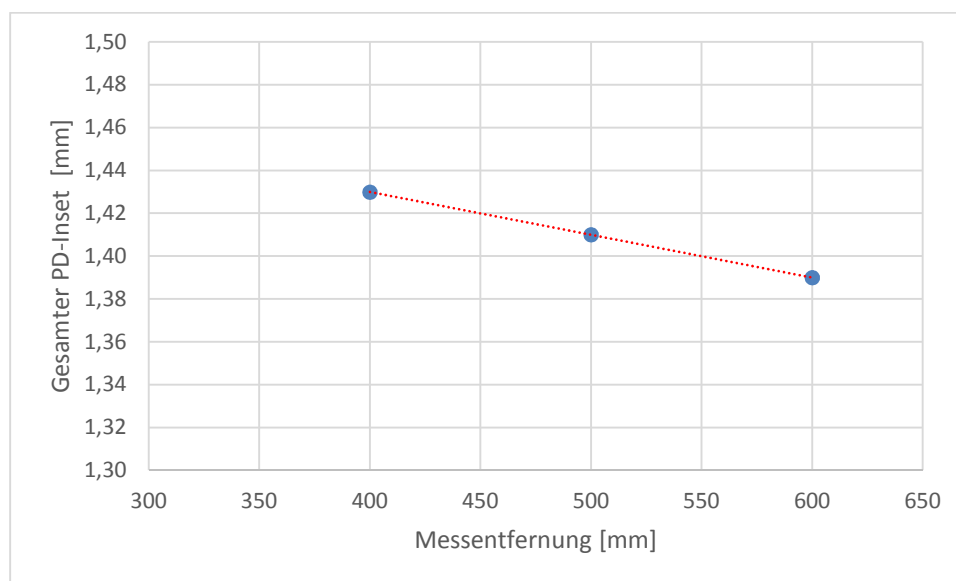


Abbildung 57 Linearer Zusammenhang zwischen Messentfernung und ermittelten PD-Insets im Bereich von 400-600 mm

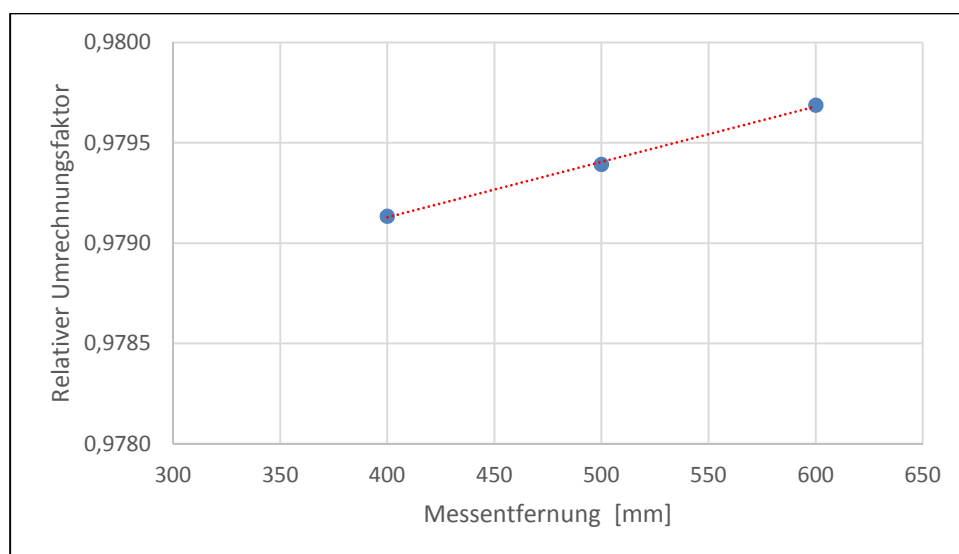
Wird für jede Messentfernung die ermittelte „Nah-PD“ ins Verhältnis zur Fern-PD gesetzt, ergeben sich relative Umrechnungsfaktoren für jede einzelne Distanz. Jene sind in Tabelle 11 berechnet.

Tabelle 11 Berechnung der Umrechnungsfaktoren für die jeweilige Messentfernung

Proband 4	PD Ferne (Viktorin)	PD Nähe (Kamera direkt) <i>perspektivisch korrigiert</i>	Relativer Umrechnungsfaktor
	Gesamt [mm]	Gesamt [mm]	PD Nähe ÷ PD Ferne
MW	Entfernung 400 mm		
	68,50	67,07	0,97913600
MW	Entfernung 500 mm		
	68,50	67,09	0,97939356
MW	Entfernung 600 mm		
	68,50	67,11	0,97968850
MW	Entfernung 10000 mm (hypothetisch)		
	68,50	68,43	0,99897810

Bei einer Messentfernung 400 mm beträgt die ermittelte PD (67,07 mm) beispielsweise 97,91% von der tatsächlich vorliegenden PD im Kunstkopf. Bei 500 mm beträgt sie 97,94% und bei 600 mm beträgt sie 97,97% von der tatsächlich vorliegenden PD.

Diese Faktoren besitzen folglich ebenfalls einen – gegebenenfalls durch Zufall entstandenen – scheinbar linearen Zusammenhang. Dieser ist in Abbildung 58 dargestellt.

**Abbildung 58 Relative Umrechnungsfaktoren der korrigierten Nah-PD zur tatsächlich vorhandenen PD bei verschiedenen Messentfernungen**

Durch Berechnung der Geradengleichung lassen sich in diesem Messbereich die Umrechnungsfaktoren für die tatsächliche PD bestimmen. Das heißt, in diesem Distanzbereich kann der Kamerafehler durch die Gleichung korrigiert werden. Für die Korrektur des Kamerafehlers in größeren Messentfernungen ist diese Geradengleichung aus oben genannten Gründen jedoch nicht mehr zutreffend. Hierzu müsste eine Extrapolation durchgeführt werden, wofür weitere Messwerte fehlen.

Die Gerade ist durch zwei Punkte definiert, deren x- und y-Koordinaten bekannt sind. Durch Berechnung ihrer Steigung und ihres Y-Achsenabschnitts lässt sich die Gerade in der Form $y = mx + b$ mathematisch beschreiben.

Die Steigung m berechnet sich über den Tangens im Bogenmaß nach Formel 2.36

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.36)$$

mit $\Delta y = 0,979136 - 0,9796885 = 0,0005525$

$$\Delta x = 600 - 400 = 200$$

Der y-Achsenabschnitt b berechnet sich nach Formel 2.37

$$b = y_1 - m * x_1 \quad (2.37)$$

mit $y_1 = 0,979136$

$$x_1 = 400$$

$$m = 2,76247 * 10^{-6}$$

Die berechnete Geradengleichung zeigt Formel 2.38. Durch Einsetzen der entsprechenden Messentfernung in Millimetern an der Stelle x ergibt sich der jeweilige Faktor zur Korrektur des Kamerafehlers.

$$y = 0,00000276247 * x + 0,97803101 \quad (2.38)$$

Die ermittelte, perspektivisch korrigierte „Nah-PD“ wird schließlich durch den errechneten Faktor dividiert, wodurch die tatsächliche Pupillendistanz erhalten wird. Das lässt sich durch Formel 2.39 beschreiben.

$$PD_{N_tatsächlich} = \frac{PD_{N_gemessen}}{0,00000276247 * a + 0,97803101} \quad (2.39)$$

a = Messentfernung [mm]

Zur Korrektur der Pupillendistanzen der Probanden kann diese Formel nicht angewendet werden, da die Augen der Probanden bei den jeweiligen Messentfernungen eine andere Konvergenzstellung einnehmen. Die Pupillendistanz des Kunstkopfes, anhand welcher diese Korrekturgleichung errechnet ist, beträgt bei allen Prüfdistanzen hingegen stets 68,50 mm.

3.3.3 Genauigkeit innerhalb der Messreihen

Für die Betrachtung der Messgenauigkeit werden die PD-Insets der Probanden für jede Messreihe in Boxplots dargestellt. Dazu wird bei der jeweiligen Untersuchung für die zehn Messwerte je Proband das 0,25-Quantil, der Median und das 0,75-Quantil bestimmt.

Da der Schwerpunkt der Arbeit auf den direkten Kameramessungen liegt, werden lediglich für ebendiese die Boxplots betrachtet.

Die Darstellung der Boxplots geschieht unter Verwendung der berechneten Insets, da diese in einem dichteren Wertebereich beieinander liegen als die ermittelten Pupillendistanzen (Nähe). Dadurch ist bei einer simultanen Darstellung eine feiner abgestufte Skalierung der Ordinate möglich, wodurch die Schwankungen innerhalb einer Messreihe (im Zehntel-Millimeter-Bereich) besser erkennbar sind.

Hierzu werden bei dem jeweiligen Probanden die zehn erhaltenen binokularen Pupillendistanzen aus einer Messreihe jeweils von der Gesamt-Fern-PD nach Viktorin subtrahiert. Dies ist als Beispiel für Proband 2 in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12 Beispiel Proband 2 - Berechnung der binokularen PD-Insets einer Messreihe

Messung	PD Ferne (Viktorin)	PD Nähe (Kamera direkt) <i>perspektivisch korrigiert</i> Unveränderte VN	PD-Inset (Kamera direkt) <i>perspektivisch korrigiert</i> Unveränderte VN
	Gesamt [mm]	Gesamt [mm]	Gesamt [mm]
1	64	62,294	1,706
2	64	62,392	1,608
3	64	62,392	1,608
4	64	62,340	1,660
5	64	62,375	1,625
6	64	62,360	1,640
7	64	62,382	1,618
8	64	62,398	1,602
9	64	62,375	1,625
10	64	62,360	1,640

Aus den zehn binokularen PD-Insets werden die benötigten statistischen Kenngrößen ermittelt. Dies geschieht über entsprechende Befehle in Excel. Im obigen Beispiel ergeben sich schließlich folgende Kenngrößen in Tabelle 13.

Tabelle 13 Beispiel für Proband 2 - Ermittlung der benötigten Kenngrößen aus den PD-Inset-Werten

Statistische Kenngrößen	Gesamter PD-Inset (Kamera direkt - unveränderte VN) <i>perspektivisch korrigiert</i> [mm]
Maximum	1,706
0,75-Quantil	1,640
Median	1,625
0,25-Quantil	1,611
Minimum	1,602

Auf diese Weise wird nun bei allen Messreihen und Probanden vorgegangen. In den Boxplots sind zusätzlich der kleinste und der größte gemessene Wert innerhalb einer Messreihe abzulesen. Je gestreckter die einzelnen Boxen sind, desto stärker streuen die einzelnen Messergebnisse; je schmalere die einzelnen Boxen sind, desto dichter liegen die zehn einzelnen Messwerte zusammen. Im Folgenden werden nun die Ergebnisse für die direkten Kameramessungen dargestellt.

Abbildung 59 zeigt das Boxplot zu der direkten Kameramessung bei unveränderter Vorneigung. Es ist zu sehen, dass die Schwankungen innerhalb der

Messreihen zwischen den Probanden unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Bei Proband 1 liegen die zentralen 50% der zehn gemessenen PD-Insets in einem Bereich von etwa 0,10 mm, bei Proband 2 und 4 in einem Bereich von etwa 0,04 mm und bei Proband 3 in einem Bereich von 0,06 mm.

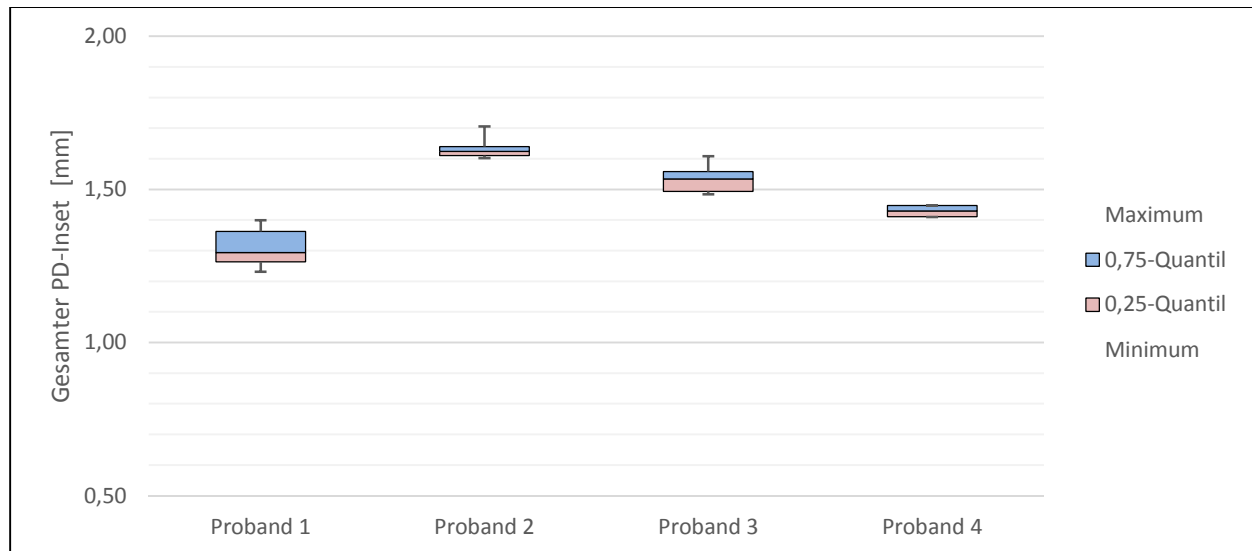


Abbildung 59 Verteilung der Einzelmesswerte (perspektivisch korrigierte binokulare PD-Insets) innerhalb der Messreihe "Kamera direkt – Unveränderte VN"

Die Einzelergebnisse bei den Messungen am Kunstkopf weisen die geringste Streuung auf. In Abbildung 60 sind deren Verteilungen dargestellt. Bei allen drei Messungen liegen die Werte innerhalb des Quartilsabstands in einem Bereich von etwa 0,04 mm.

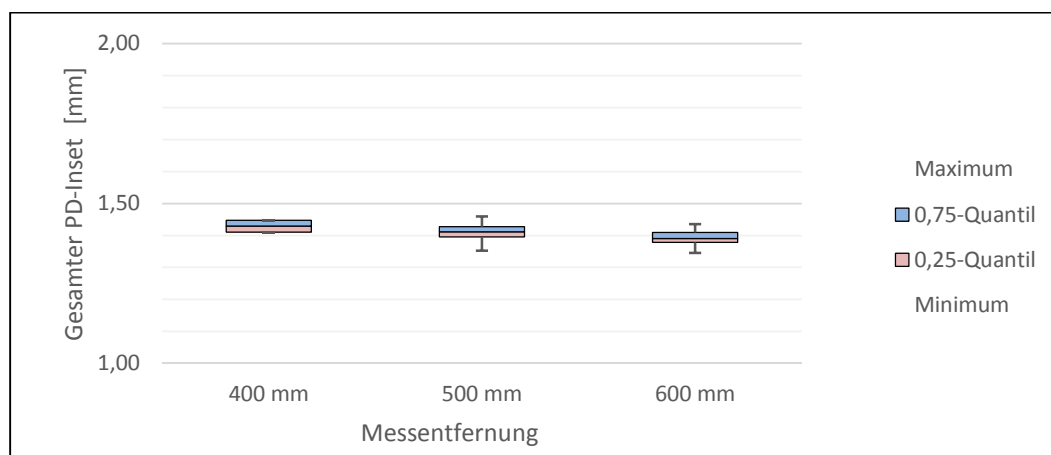


Abbildung 60 Verteilung der Einzelmesswerte (perspektivisch korrigierte binokulare PD-Insets) bei direkter Kameramessung am Kunstkopf aus verschiedenen Messentfernungen

3.4 Berechnung des geometrischen Insets

Zum Vergleich der Ergebnisse werden nun die geometrischen Insets auf Brillenglasebene und Irisblattebene berechnet. Erste dienen dem Vergleich mit den Insets aus Pupillometermessung und Spiegelmethode, zweite dienen dem Vergleich mit den PD-Insets aus den direkten Kameramessungen. Die erforderlichen Strecken sind in Abbildung 61 dargestellt.

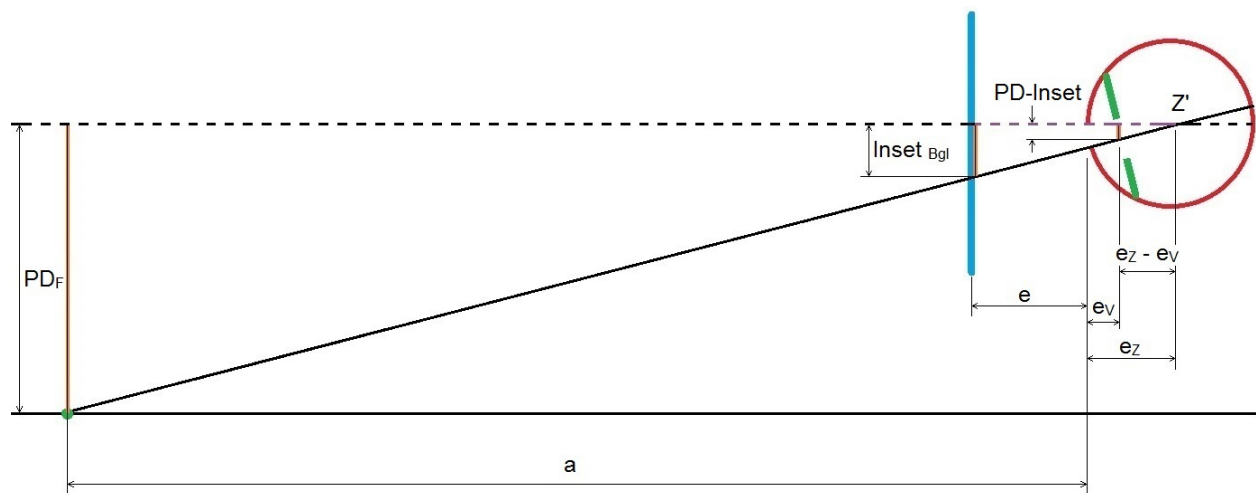


Abbildung 61 Erforderliche Strecken zur Berechnung der geometrischen Insets

Wie in Abbildung 61 erkennbar, wird der Inset über die monokulare Fern-PD für jedes Auge separat berechnet und anschließend mit dem des anderen Auges zum Gesamt-Inset addiert.

Da alle Messungen mit Plangläsern durchgeführt sind, müssen bei der Berechnung keine prismatischen Nebenwirkungen berücksichtigt werden. Es besteht jedoch durch die optische Dicke der verwendeten Plangläser ein optischer Versatz von binokular etwa 0,1 mm (Berechnung im Anhang). Die ist in dieser Arbeit allerdings nicht berücksichtigt.

Brillenglasebene

Der geometrische Inset auf Brillenglasebene wird nach Formel 2.5 aus Kapitel 2.1.3 berechnet. Dabei sind alle Strecken in Millimeter einzusetzen.

$$Inset_{geom_Bgl} = \frac{(e + e_Z) * PD_F}{(a + e_Z)} \quad (2.5)$$

Die Strecke e_Z muss beim Ametropen über Formel 2.6 aus demselben Kapitel separat berechnet werden, beim Emmetropen beträgt sie 13,5 mm.

$$e_Z = 13,5 \text{ mm} - 0,2 * \frac{S_{\ddot{A}}}{dpt} \quad (2.6)$$

Irisblattebene

Der geometrische PD-Inset auf Irisblattebene errechnet sich über Formel 2.40. Bei dieser Berechnung muss die Vorderkammertiefe berücksichtigt werden. Das Irisblatt liegt in etwa um die Strecke e_V der Vorderkammertiefe hinter dem Hornhautscheitel. Diese beträgt ca. 3,52 mm nach Gullstrand (Diepes, H. 2004).

$$Inset_{geom_Iris} = \frac{(e_Z - e_V) * PD_F}{(a + e_Z)} \quad (2.40)$$

Die daraus berechneten Insets sind in Tabelle 14 dargestellt. Für den Kunstkopf wird mit dem HSA und der Fern-PD ebenfalls der geometrische Inset berechnet, obwohl seine Augen nicht konvergieren können. Dies mag auf den ersten Blick wenig sinnvoll erscheinen, da aber bei allen Messungen auch für den Kunstkopf ein Inset ermittelt wurde, sollen auch diese den theoretisch berechneten Insets gegenübergestellt werden.

Tabelle 14 Geometrisch berechnete Insets auf Brillenglasebene und Irisebene

Proband	Geometrischer Inset (Brillenglasebene)			Geometrischer Inset (Irisblattebene)		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	1,83	1,77	3,60	0,76	0,73	1,49
2	2,09	2,15	4,24	0,83	0,86	1,69
3	2,14	2,08	4,22	0,79	0,77	1,55
4	1,96	1,93	3,89	0,83	0,82	1,65

3.5 Umrechnung von Iris- auf Brillenglasebene

Beim abschließenden Vergleich sollen auch die PD-Insets aus den direkten Kameramessungen mit Insets aus anderen Messungen verglichen werden. Da sich jene PD-Insets der Kameramessungen theoretisch auf Irisblattebene befinden, werden sie – für jedes Auge separat – auf Brillenglasebene umgerechnet. Auch bei dieser Berechnung wird wieder die Strecke der Vorderkammertiefe e_v von 3,52 mm benötigt. Abbildung 62 soll die für die Berechnung benötigten Strecken veranschaulichen.

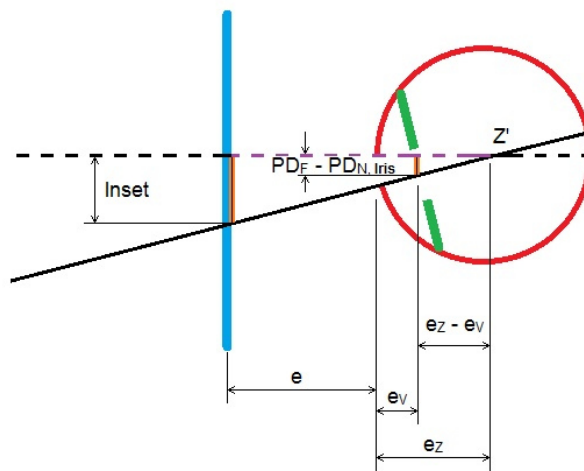


Abbildung 62 Zur Umrechnung des Insets auf Brillenglasebene erforderliche Strecken

Mit dem Dreisatz lassen sich nun die ermittelten PD-Insets näherungsweise auf Brillenglasebene umrechnen.

Dazu werden zunächst die Strecken ins Verhältnis gesetzt (Formel 2.41). PD_{N_Iris} ist die perspektivisch korrigierte monokulare Nah-PD aus den Fotos.

$$\frac{Inset}{e + e_z} = \frac{PD_F - PD_{N_Iris}}{e_z - e_v} \quad (2.41)$$

Diese Streckenbeziehung wird nach dem *Inset* umgestellt. Daraus resultiert Formel 2.42.

$$Inset = (e + e_z) * \frac{PD_F - PD_{N_Iris}}{e_z - e_v} \quad (2.42)$$

Die daraus umgerechneten Insets auf Brillenglasebene sind in Tabelle 15 dargestellt. Auch für den Kunstkopf wird der ermittelte PD-Inset aus den Kameramessungen umgerechnet, um jenen mit den Insets aus Pupillometermessungen und Spiegelmethode vergleichen zu können.

Tabelle 15 Korrigierte PD-Insets aus Kameramessung umgerechnet auf Brillenglasebene

Proband	PD-Inset (Kamera direkt - auf Irisblatt) <i>perspektivisch korrigiert</i>			Inset (Kamera - umgerechnet auf Brillenglas)		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	1,41	-0,08	1,31	3,40	-0,19	3,21
2	0,95	0,68	1,63	2,38	1,71	4,09
3	1,31	0,22	1,53	3,58	0,60	4,18
4	0,62	0,81	1,43	1,45	1,92	3,37

Vergleich mit den geometrischen Insets

Die Ergebnisse der bisher aufgeführten Messungen und Berechnungen sind in Tabelle 16 aufgeführt. Hierbei handelt es sich um die Gesamt-Insets. Für jeden Wert werden zum Vergleich die jeweiligen Differenzen zu den geometrisch berechneten Insets gebildet. Die orangefarbenen Werte sind die Differenzen zum geometrischen Inset auf Brillenglasebene, die blauen Werte sind die entsprechenden Differenzen zum geometrischen PD-Inset auf Irisblattebene. Je kleiner diese Differenzen sind, desto näher liegt folglich der jeweilige Messwert am geometrisch berechneten Inset. Auf die Werte des Kunstkopfes wird nicht näher eingegangen, da er, wie bereits erwähnt, eine Sonderstellung einnimmt. Die Werte sind der Vollständigkeit wegen mit aufgeführt und können bei Interesse der Tabelle entnommen werden.

Tabelle 16 Vergleich der Messwerte mit den geometrischen Insets auf Brillenglasebene und Irisblattebene

Proband	1		2		3		4	
Gesamt-Inset (R+L) in [mm]	Berechnet / Gemessen	Abweichung	Berechnet / Gemessen	Abweichung	Berechnet / Gemessen	Abweichung	Berechnet / Gemessen	Abweichung
Geometrischer Inset Brillenglasebene	3,60	A	4,24	A	4,22	A	3,89	A
Geometrischer Inset Irisblattebene ev 3,52 mm	1,49	B	1,69	B	1,55	B	1,65	B
Inset Pupillometer	3,00	A 0,60 B 1,51	3,40	A 0,84 B 1,71	3,60	A 0,62 B 2,05	2,25	A 1,64 B 0,60
Inset Spiegelmethode	3,50	A 0,10 B 2,01	4,00	A 0,24 B 2,31	4,00	A 0,22 B 2,45	3,00	A 0,89 B 1,35
PD-Inset Kamera (Rohdaten - Irisblatt)	2,91	A 0,69 B 1,42	3,64	A 0,60 B 1,95	3,67	A 0,56 B 2,11	3,09	A 0,80 B 1,44
PD-Inset Kamera (persp. korrigiert - Irisblatt)	1,31	A 2,29 B 0,18	1,63	A 2,61 B 0,06	1,53	A 2,69 B 0,02	1,43	A 2,46 B 0,22
Inset Kamera (umgerechnet auf Brillenglas)	3,21	A 0,38 B 1,72	4,09	A 0,15 B 2,40	4,18	A 0,05 B 2,62	3,37	A 0,53 B 1,71

Der reine Pupillometer-Inset ist bei allen drei Probanden zwischen 0,60 mm und 0,84 mm kleiner als der theoretisch berechnete Inset auf Scheibenebene. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Bei der Einstellung des Pupillometers auf nahe Distanzen ändert sich etwas im Geräteinneren, wodurch auch am Kunstkopf ohne Konvergenz eine Nah-PD messbar ist. Um dem auf den Grund zu gehen, müsste das Gerät genauer untersucht werden.

Die Insets nach der Spiegelmethode sollten in der Theorie dem Brillenglas-Inset entsprechen. Bei Betrachtung der Werte sind sie bei allen drei Probanden zwischen 0,10 mm und 0,24 mm kleiner als der geometrisch berechnete Brillenglas-Inset. Unter Berücksichtigung der Strichstärke von 0,40 mm des verwendeten Stifts sind diese Ergebnisse bereits sehr genau.

Beim Vergleich der nicht korrigierten PD-Insets aus den Kameramessungen lässt sich erkennen, dass jene Werte bei allen drei Probanden zwischen den geometrischen Insets auf Brillenglasebene und Irisblattebene liegen. Diese sollten

idealerweise in etwa mit den berechneten Werten auf Irisblattebene übereinstimmen, jedoch sind sie noch mit dem perspektivischen Fehler der Fotos behaftet. Bei den korrigierten PD-Insets aus den Kameramessungen ist dieser Fehler heraus gerechnet. Diese Werte sind bei allen Probanden zwischen 0,02 mm und 0,18 mm kleiner als der geometrisch berechnete PD-Inset. Da für die Brillenglaszentrierung allerdings der Inset auf Scheibenebene von Interesse ist, wird der korrigierte PD-Inset aus den Kameramessungen auf Brillenglasebene umgerechnet. Diese Werte sind bei allen Probanden etwas kleiner als die jeweiligen geometrischen Insets. Bei Proband 1 ist die Abweichung mit 0,38 mm am größten, Proband 2 und 3 liegen hingegen mit 0,15 mm und 0,05 mm sehr nahe am berechneten Wert.

Vergleich der Insets (Kamera mit Pupillometer und Spiegelmethode)

Um die auf Brillenglasebene umgerechneten Insets aus den Kameramessungen nicht nur mit theoretischen Werten, sondern auch mit Werten aus der augenoptischen Praxis zu vergleichen, sind sie in Tabelle 17 den Insets der Pupillometermessungen und der Spiegelmethode durch Differenzenbildung gegenübergestellt.

Tabelle 17 Vergleich der auf Brillenglasebene umgerechneten Gesamt-Insets der Kameramessungen mit den Gesamt-Insets aus Pupillometermessungen und Spiegelmethode

Proband	Kamera (umgerechnet Bgl.) - Pupillometer			Kamera (umgerechnet Bgl.) - Spiegelmethode		
	Inset Kamera [mm]	Inset Pupillometer [mm]	Differenz [mm]	Inset Kamera [mm]	Inset Spiegelmeth. [mm]	Differenz [mm]
1	3,21	3,00	0,21	3,21	3,50	-0,29
2	4,09	3,40	0,69	4,09	4,00	0,09
3	4,18	3,60	0,58	4,18	4,00	0,18
4	3,37	2,25	1,12	3,37	3,00	0,37

Beim Vergleich der Differenzen lässt sich erkennen, dass die Abweichungen zwischen den umgerechneten Insets aus den Kameramessungen und denen der Spiegelmethode am geringsten sind. Lediglich bei Proband 1 besteht eine größere

Abweichung von 0,29 mm. Außerdem ist dies der einzige Wert, der ein negatives Vorzeichen besitzt, was bedeutet, dass der durch Kameramessung ermittelte Inset kleiner ist als jener der Spiegelmethode. Auch nach dem t-Test unterscheiden sich die Insets aus den Kameramessungen nicht signifikant von jenen der Spiegelmethode ($t = 0,728$; $t_{3; 0,05} = 3,182$). Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Pupillenposition bei der Spiegelmethode nach Augenmaß bestimmt wird und die Messgenauigkeit mit Folienstift und Zentrierschablone bei etwa 0,50 mm liegt, stimmen die Werte recht gut miteinander überein. Zwischen den Insets aus den Kameramessungen und jenen aus den Pupillometermessungen besteht hingegen ein signifikanter Unterschied ($t = 4,007$; $t_{3; 0,05} = 3,182$).

Alle gemessenen, errechneten und umgerechneten Insets sind in Abbildung 63 grafisch dargestellt. Im linken Diagramm finden sich die Insets auf Brillenglas-ebene, im rechten Diagramm finden sich entsprechend die PD-Insets auf Irisblattebene. Die berechneten geometrischen Insets sind als Orientierungswerte etwas dicker dargestellt. Im linken Diagramm wird deutlich, dass die perspektivisch korrigierten und umgerechneten Insets aus den Kameramessungen den geometrisch berechneten Insets auf Brillenglasebene am nächsten kommen. Im rechten Diagramm lässt sich erkennen, dass die perspektivisch korrigierten PD-Insets aus den Kameramessungen nahe an den geometrisch berechneten PD-Insets liegen. Proband 1 zeigt dabei in beiden Diagrammen die größten Abweichungen dieser Werte auf. Der Kunstkopf ist auch bei dieser Betrachtung außen vor zu lassen.

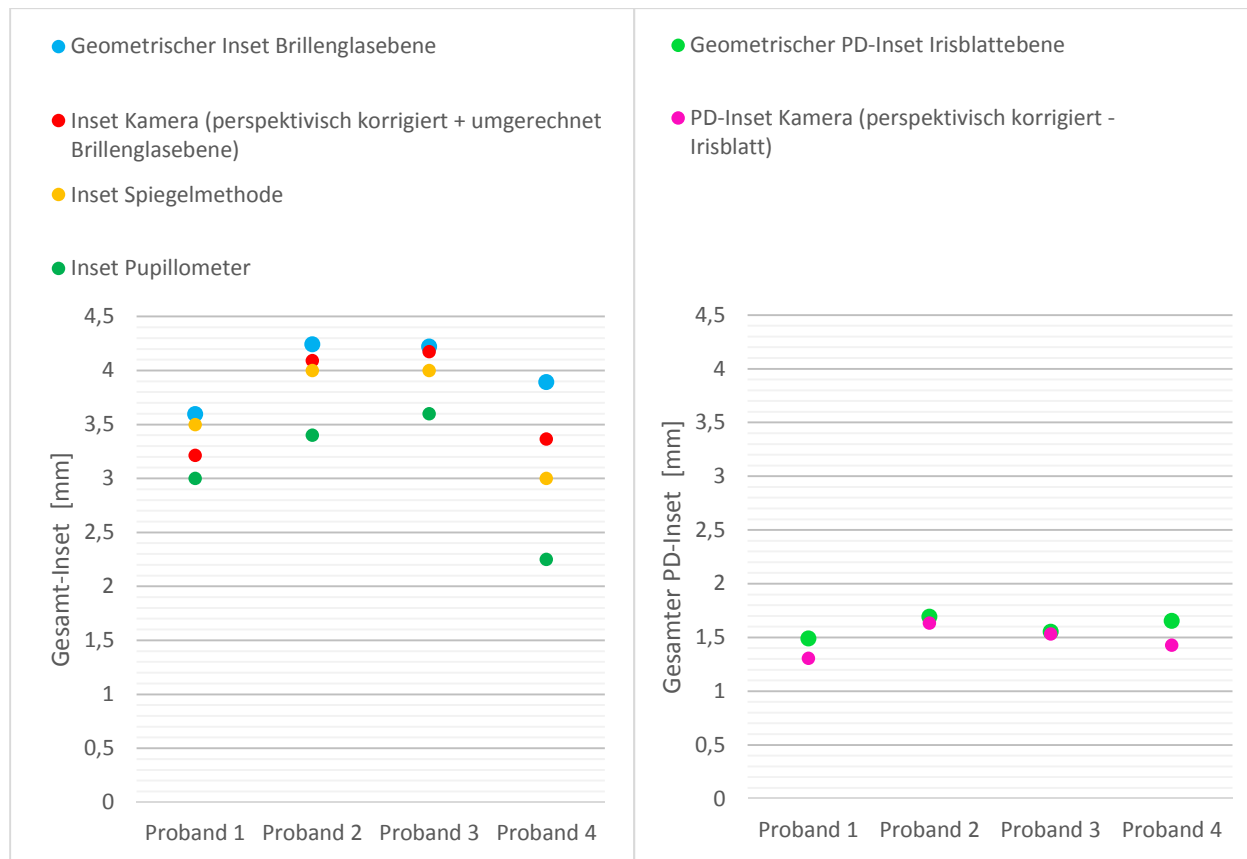


Abbildung 63 Grafische Darstellung der ermittelten Gesamt-Insets. Im linken Diagramm die Insets auf Brillenglasebene, im rechten Diagramm die PD-Insets auf Irisblattebene

3.6 Weitere Messergebnisse

Kapitel 2.2 ist zu entnehmen, dass noch weitere Messungen durchgeführt wurden. Darunter wurde die Spiegelmethode mittels Kamera bei statischer und habitueller Kopfhaltung durchgeführt, ferner wurden direkte Kameramessungen bei einem Inklinationsdelta von 10° durchgeführt und schließlich wurde bei Proband 3 eine weitere Messreihe bei direkter Fixation eines Landoltringes vor dem Kameraobjektiv erstellt. Diese Ergebnisse sind in sich nicht ganz schlüssig und bedürfen einer weiteren, genaueren Untersuchung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich ist. Außerdem tragen die Ergebnisse jener Messreihen nicht maßgebend zu den Erkenntnissen dieser Arbeit bei. Ferner tragen sie nicht zur Übersichtlichkeit dieses Kapitels bei. In Abbildung 64 sind diese Messwerte dargestellt. Zur

Orientierung ist zusätzlich der geometrische PD-Inset auf Irisblattebene eingefügt. Es wird ersichtlich, dass sich die Gesamt-Insets dieser Messungen im unteren Bereich der Punktmenge befinden, und in ihrer Werteverteilung wenig Ähnlichkeit mit den anderen Messergebnissen aufweisen, wodurch sie relativ wenig Aussagekraft besitzen. Einzig die Werteverteilung der Messreihe „Kamera über Spiegel - KSS“ zeigt noch im unteren Diagrammbereich Parallelen zu den anderen Messergebnissen auf. Die ausführliche, tabellarische Aufführung dieser Messergebnisse findet sich im Anhang.

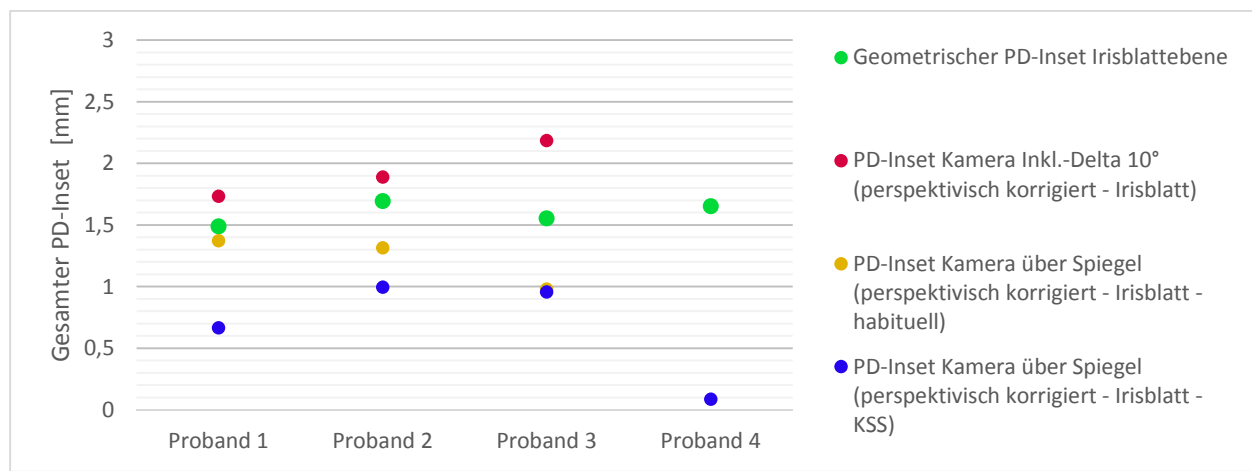


Abbildung 64 Grafische Darstellung aller ermittelten Gesamt-Insets. Zusätzlich hervorgehobene Darstellung der Insets zu den Messreihen „Kamera direkt Inklinationsdelta 10°“, „Kamera über Spiegel – KSS und habituell“ und „Kamera direkt Landoltring“

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Als Ausgangswert für die Berechnung des Insets wurden die Pupillendistanzen für die Ferne gemessen. Dies erfolgte zunächst durch zehn Einzelmessungen je Proband mittels Pupillometer und durch den anschließenden Abgleich nach Viktorin. Bei allen drei Probanden ist die gemittelte binokulare Pupillendistanz (Ferne) der Pupillometermessungen zwischen 0,50 mm und 0,60 mm kleiner als die nach Viktorin abgeglichenen. Welche der durchgeführten Methoden die „richtige“ Pupillendistanz liefert, kann nicht konkret gesagt werden, da die „wahre“ PD des jeweiligen Probanden nicht bekannt ist. Lediglich am Kunstkopf ist es prinzipiell möglich, die tatsächliche PD direkt auszumessen und zum Vergleich heranzuziehen. Allerdings besteht hier zwischen beiden Messmethoden lediglich eine Differenz von 0,15 mm. Die Messung mittels Pupillometer ergab dabei 68,35 mm und der Viktorin-Abgleich 68,50 mm. Selbst bei direkter Messung der tatsächlichen PD mittels Lineal lässt sich nicht eine derartige Genauigkeit erzielen, um Rückschlüsse daraus zu ziehen, welche der beiden Messmethoden nun die „wahre“ PD lieferte.

Die binokularen Pupillendistanzen für die Nähe wurden aus zehn Einzelmessungen mittels Pupillometer und durch die Spiegelmethode ermittelt. Die Messentfernungen betrugen bei diesen Messungen 400 mm. Zwischen den gemittelten Werten der Pupillometermessungen und den Messwerten der Spiegelmethode bestehen bei den drei Probanden binokular Differenzen zwischen 0,05 mm und 0,20 mm. Diese Pupillendistanzen für die Nähe stimmen für beide Messmethoden recht gut miteinander überein. Beim Kunstkopf hingegen weichen die Messwerte beider Methoden um 0,60 mm voneinander ab. Die Messung mittels Pupillometer ergab gemittelt 66,10 mm, die Messung über die Spiegelmethode ergab 65,50 mm.

Die resultierenden binokularen Insets aus diesen Messungen weisen ebenfalls gewisse Abweichungen auf. Die Gesamt-Insets aus den reinen Pupillometerwerten für Ferne und Nähe betragen für Proband 1 bis 4 in dieser Reihenfolge 3,00 mm, 3,40 mm, 3,60 mm und 2,25 mm. Die Insets aus den Fernwerten nach Viktorin und den Nahwerten der Spiegelmethode betragen 3,50 mm, 4,00 mm,

4,00 mm und 3,00 mm. Bei den ersten drei Probanden sind die reinen Pupillometer-Insets zwischen 0,40 mm und 0,60 mm kleiner als die Insets der Spiegelmethode bezogen auf die Fernwerte nach Viktorin. Diese Differenzen resultieren größtenteils aus den ermittelten Pupillendistanzen für die Ferne. Hier zeigen sich bei den Pupillometerwerten bereits Abweichungen etwa dieser Größenordnung in die „kleinere Richtung“. Beim Kunstkopf ist der Gesamt-Inset aus den Pupillometerwerten um 0,75 mm kleiner als jener nach Spiegelmethode. Diese Abweichung hingegen resultiert größtenteils aus der Differenz der gemessenen Pupillendistanzen in der Nähe. Die binokulare Nah-PD der Pupillometermessungen ist 0,60 mm größer als diejenige nach Spiegelmethode, folglich ist der Pupillometer-Inset kleiner.

Die binokularen PD-Insets aus den direkten Messungen mittels Kamera betragen nach der unmittelbaren Auswertung der Fotos ohne perspektivische Korrektur und Umrechnung auf Brillenglasebene für Proband 1 bis 4 in dieser Reihenfolge zunächst 2,91 mm, 3,64 mm, 3,67 mm und 3,09 mm. Diese Werte resultieren aus der Differenz der PD nach Viktorin (Ferne) und dem Mittelwert der zehn ausgewerteten Pupillendistanzen aus den Fotos (Nähe) je Proband. Die Messentfernung betrug ebenfalls 400 mm. Die erhaltenen PD-Insets beziehen sich theoretisch auf die Irisblattebene, allerdings sind sie noch mit einem perspektivischen Fehler behaftet. Nach der Korrektur der ursprünglichen Pupillendistanzen aus den Fotos betragen die perspektivisch korrigierten binokularen PD-Insets 1,31 mm, 1,63 mm, 1,53 mm, 1,43 mm. Jene sind die Insets auf Irisblattebene.

Die korrigierte PD aus den Fotos sollte beim Kunstkopf eigentlich der tatsächlich eingearbeiteten Pupillendistanz entsprechen, das heißt, der PD-Inset sollte theoretisch 0,00 mm betragen. Da dies jedoch nicht der Fall ist, wurde dieser Umstand in zwei zusätzlichen Messreihen in 500 mm und 600 mm Messdistanz mittels Kamera untersucht. Der perspektivisch korrigierte binokulare PD-Inset aus den Fotos beträgt bei 500 mm Distanz 1,41 mm und bei 600 mm Distanz 1,39 mm. Die PD-Insets werden mit zunehmender Messentfernung kleiner. Es zeigt sich zumindest in dem untersuchten Messbereich ein scheinbar linearer Zusammenhang der Messwerte. Diese vermeintliche Linearität kann allerdings nicht für alle Messentfernungen bestehen bleiben, da sich der PD-Insetwert mit zunehmender Distanz

an einen Grenzwert von 0,00 mm annähern sollte. Für die gemessenen Distanzen wurden die Relativwerte der korrigierten Pupillendistanzen der Fotos zu der Pupillendistanz für die Ferne errechnet und der scheinbar lineare Zusammenhang dieser Werte durch die zugehörige Geradengleichung beschrieben. Diese lautet $y = 0,00000276247 \cdot x + 0,97803101$. Mit dieser Gleichung lassen sich im untersuchten Distanzbereich die aus den Fotos ermittelten und korrigierten Pupillendistanzen auf die tatsächlich im Kunstkopf vorliegende PD umrechnen. Zur Korrektur der Pupillendistanzen der Probanden lässt sich diese Gleichung nicht anwenden, da jene bei den verschiedenen Messentfernungen unterschiedlich konvergente Augenstellungen besitzen.

Da für die augenoptische Praxis der Inset auf Brillenglasebene von Interesse ist, wurden die perspektivisch korrigierten PD-Insets aus den Kameramessungen für jeden Probanden individuell auf Brillenglasebene umgerechnet. Für Proband 1 bis 4 ergibt sich in dieser Reihenfolge ein binokularer Inset von 3,21 mm, 4,09 mm, 4,18 mm und 3,37 mm.

Zur Überprüfung auf Plausibilität wurden anhand der individuellen Parameter der Probanden die geometrischen Insets berechnet. Auf Brillenglasebene betragen diese nach der Reihenfolge der Probanden binokular 3,60 mm, 4,24 mm, 4,22 mm und 3,89 mm. Der Kunstkopf ist aufgrund seiner fehlenden Konvergenz aus einem Vergleich ausgeschlossen. Für die ersten drei Probanden liegen die Differenzen der umgerechneten Insets aus den Kameramessungen zu den geometrischen Insets in einem Bereich zwischen 0,05 mm und 0,38 mm.

Die perspektivisch korrigierten binokularen PD-Insets aus den Kameramessungen wurden mit den berechneten geometrischen PD-Insets auf Irisblattebene verglichen. Diese betragen in der Reihenfolge der Probanden 1,49 mm, 1,69 mm, 1,55 mm und 1,65 mm. Für die ersten drei Probanden liegt die Abweichung der korrigierten PD-Insets aus den Kameramessungen zu jenen geometrisch berechneten in einem Bereich zwischen 0,02 mm und 0,18 mm. Der Kunstkopf ist auch bei diesem Vergleich ausgeschlossen.

In einem weiteren Vergleich werden die Gesamt-Insets der Spiegelmethode bezogen auf die PD nach Viktorin (Ferne) mit den berechneten geometrischen Insets

auf Brillenglasebene gegenübergestellt. Für Proband 1 bis 3 liegen die Abweichungen in einem Bereich von 0,10 mm bis 0,24 mm.

Die Gegenüberstellung der reinen binokularen Pupillometer-Insets mit den geometrischen Gesamt-Insets auf Brillenglasebene zeigt eine Abweichung für Proband 1 bis 3 in einem Bereich zwischen 0,60 mm und 0,84 mm.

Bei Betrachtung dieser beiden Abweichungsbereiche zeigt sich, dass die Inset-Werte der Spiegelmethode näher an den Werten der geometrisch berechneten Insets auf Brillenglasebene liegen. Daraus lassen sich Rückschlüsse ziehen, welche der gemessenen Pupillendistanzen für die Ferne eher den „wahren“ Pupillendistanzen entsprechen, da die gemessenen Pupillendistanzen (Nähe) mittels Pupillometer und Spiegelmethode nahezu gleich sind. Demnach sollte die Fern-PD nach Viktorin näher an der „wahren“ Pupillendistanz liegen, da die Abweichungen der hiermit berechneten Insets zu den geometrischen Insets am geringsten sind.

Ferner wurden die auf Brillenglasebene umgerechneten PD-Insets der Kameramessungen mit den Insets aus den Pupillometermessungen und der Spiegelmethode verglichen. Die Abweichungen zu den Pupillometer-Insets liegen für Proband 1 bis 3 binokular in einem Bereich von 0,21 mm bis 0,69 mm. Die Abweichungen zu den Insets aus der Spiegelmethode liegen bei jenen Probanden hingegen in einem Bereich zwischen 0,09 mm und 0,29 mm. Auch hier zeigt sich eine genauere Übereinstimmung der Insets auf Brillenglasebene zwischen Spiegelmethode und umgerechneten Insets der Kameramessungen.

Die Messgenauigkeit der Kameramessungen wurde innerhalb der Messreihe je Proband aus den perspektivisch korrigierten PD-Insets der zehn Einzelmessungen untersucht. Hierzu wurde der Quartilsabstand zwischen dem 0,25-Quantil und dem 0,75-Quantil betrachtet, innerhalb dessen sich 50% aller Messwerte befinden. Bei der direkten Kameramessung bei einer Messentfernung von 400 mm liegen die Quartilsabstände der perspektivisch korrigierten PD-Insets für Proband 1 bis 4 in dieser Reihenfolge bei 0,10 mm, 0,03 mm, 0,06 mm und 0,04 mm.

Die gleiche Untersuchung wurde bei den direkten Kameramessungen am Kunstkopf für die verschiedenen Messentfernungen durchgeführt. Hier liegen die

Quartilsabstände der perspektivisch korrigierten PD-Insets für die Messungen bei 400 mm, 500 mm und 600 mm jeweils bei etwa 0,04 mm.

Das abschließende Ergebnis dieser Arbeit sind zwei Erkenntnisse: Die erste ist die Tatsache, dass die mittels Kamera gemessene Pupillendistanz für die Nähe nicht der Nah-PD auf Brillenglasebene entspricht. Hierbei handelt es sich um die Nah-PD auf Irisblattebene. Folglich handelt es sich bei dem daraus resultierenden PD-Inset auch nicht um den im Gleitsichtglas zu fertigenden Inset. Die zweite Erkenntnis ist der Sachverhalt, dass der sich vermeintlich auf Irisblattebene befindende PD-Inset noch mit einem perspektivischen Fehler behaftet ist. Dies ist zumindest bei dieser Art der Messung, bei welcher ein Referenzsteg für die Auswertung der Fotos benötigt wird, der Fall – sofern sich dieser nicht in derselben Bildebene wie die Iris befindet.

Diese beiden Erkenntnisse lassen sich in einer Formel zusammenfassen, mit welcher der aus den Fotos ausgewertete PD-Inset perspektivisch korrigiert und auf Brillenglasebene umgerechnet werden kann. Diese Formel lautet:

$$Inset_{Bgl} = (e + e_Z) * \frac{PD_F - PD_{N_Foto} * \frac{a + e_V}{(a + e_V) - e}}{e_Z - e_V}$$

mit $e_Z = 13,5mm - 0,2 * \frac{S_{\bar{A}}}{dpt}$

$$e_V = 3,52mm$$

5 Diskussion

Ebenso wie in den eingangs aufgeführten Studien weisen auch die Untersuchungen dieser Arbeit abhängig von Proband und Messmethode unterschiedlich stark ausgeprägte Abweichungen in ihren Messergebnissen auf. Außer einer Studie, durchgeführt von A AlAnazi et al., beziehen sich alle anderen auf die Messung der Pupillendistanz für die Ferne, wobei die Messergebnisse in Abhängigkeit von den verwendeten Messgeräten, den angewandten Messmethoden (Pupillenmitte oder Hornhautreflex) und in Abhängigkeit von verschiedenen Untersuchern dargestellt wurden. Hinzu kommt, dass größtenteils die Mittelwerte und Standardabweichungen der Messergebnisse über das gesamte Probandenkollektiv ermittelt wurden, wodurch die Standardabweichungen entsprechend groß sind und sich ein direkter Vergleich mit den Messergebnissen dieser Arbeit schwierig gestaltet. Ferner werden überwiegend die Pupillendistanzen auf den Hornhautreflex bezogen untersucht. Auch ein Vergleich mit diesen Ergebnissen, die ebenfalls wieder über das gesamte Probandenkollektiv ermittelt wurden, ist etwas problematisch. Allerdings gibt es aus vorliegenden Studien auch Ergebnisse, die mit jenen dieser Arbeit verglichen werden können.

So ermittelte beispielsweise A AlAnazi eine mittlere Differenz über alle Probanden zwischen Fern- und Nah-PD von 4,40 mm bei den Messungen nach Pupillenmitte. Zum Vergleich werden die direkten Kameramessungen, umgerechnet auf Brillenglasebene, herangezogen. Der über Proband 1 bis 3 gemittelte Inset dieser Messungen beträgt 3,83 mm. Hier lässt sich bereits ein deutlicher Unterschied erkennen. Allerdings gibt es bei diesem Vergleich auch einzelne Faktoren zu berücksichtigen. A AlAnazi maß die Pupillendistanzen für Ferne und Nähe jeweils mit einem PD-Stab. Die Naheinstellentfernung war „auf eine Armlänge“ festgelegt. Ferner sind die Werte über ein Kollektiv von insgesamt 133 Probanden gemittelt, worunter sich sicherlich auch Probanden mit größeren Pupillendistanzen für die Ferne befanden, was im Mittel einen größeren Inset zur Folge hat. In den Untersuchungen dieser Arbeit handelt es sich um drei weibliche Probanden, deren Pupillendistanzen für die Ferne eher dem kleineren Segment zuzuordnen sind. In einer Reproduzierbarkeitsstudie ermittelte Wesemann (Moderne Videozentriersysteme und Pupillometer im Vergleich, 2009) durch fünf aufeinanderfolgende Pupillometermessungen an insgesamt neun Probanden die Pupillendistanzen für

die Ferne. Der Mittelwert der neun Standardabweichungen beträgt 0,34 mm. Jener Wert beträgt in dieser Arbeit für die Pupillometermessungen (Ferne) über alle vier Probanden 0,32 mm. Hier zeigen sich deutliche Parallelen in den Schwankungen der Einzelmesswerte. Durch die Abstufung von 0,50 mm-Schritten bei Pupillometern ist eine noch genauere Messgenauigkeit eher schwierig zu erreichen.

Das Ergebnis einer weiteren Studie, durchgeführt von Knopp, zeigt eine Standardabweichung der Pupillometermessungen (Ferne) von 0,51 mm. Hierbei wurde ein Proband von insgesamt 21 Untersuchern jeweils einmal gemessen. Die Streumaße in dieser Arbeit zeigen bei gleicher Messung eine höhere Messgenauigkeit. Dabei ist gut zu erkennen, dass die einzelnen Messergebnisse auch von den Untersuchern selbst abhängig sind.

Werden die Ergebnisse der verschiedenen Messungen dieser Arbeit untereinander verglichen, zeigen sich ebenfalls gewisse Abweichungen und Unterschiede zwischen den einzelnen Probanden. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Die genauere Betrachtung der Werte muss jeweils in der gleichen Kategorie erfolgen, das heißt, es können beispielsweise nur Insets auf der gleichen Bezugsebene miteinander verglichen werden. Der Kunstkopf kann bei der folgenden Diskussion nur bedingt berücksichtigt werden, da hier von vornherein durch die fehlende Konvergenz keine gemeinsame Grundlage mit den Probanden vorhanden ist.

Die Pupillendistanz für die Ferne – als Ausgangswert für die weiteren Insetberechnungen – zeigt bereits in den zwei durchgeführten Messmethoden mittels Pupillometer und nach Viktorin gewisse Unterschiede auf. Bei der Pupillometermessung können durch eine seitliche Verkipfung des Gerätes zu den Augen (beispielsweise $HSA_R > HSA_L$) bereits erste Messfehler entstehen. Außerdem ist der Aufbau des Gerätes selbst nicht bekannt. Unter Umständen zeigt es bei korrekter Messung von vornherein eine falsche PD an. Eine weitere Fehlerquelle entsteht, wenn der Proband nicht den grünen Fixationspunkt im Geräteinneren fixiert, das heißt, der Untersucher muss sich auf eine gewissenhafte Fixation des Probanden verlassen, da eine Kontrolle ebendieser nicht möglich ist. Das gilt ebenso für die anderen hier durchgeführten Messungen. Weitere Messungenauigkeiten entstehen durch die Schrittweite des Pupillometers von 0,50 mm. In dem

Wertebereich, in welchem sich die Messergebnisse der späteren Kameramessungen befinden, nämlich im Zehntel- bis Hundertstel-Millimeterbereich, machen sich 0,50 mm Abweichung in der Fern-PD bereits sehr stark in den darauf basierenden Ergebnissen bemerkbar. Die Messung nach Viktorin bietet ebenso Raum für potenzielle Messfehler. Falls sich beispielsweise Proband und Untersucher bei der Messung nicht exakt gegenüberstanden, entsteht beim Anzeichnen der Gläser ein Parallaxenfehler. Dieser wirkt sich insbesondere auf die monokularen Pupillendistanzen aus, in sehr geringem Maße jedoch auch auf die binokulare Pupillendistanz. Welcher Aspekt ebenfalls berücksichtigt werden sollte, sind die Pupillendistanzen (Ferne) von Untersucher und Proband. Bei diesen Messungen beträgt die PD des Untersuchers 70 mm. Die gemessenen Pupillendistanzen der Probanden liegen zwischen 60 mm und 64 mm. Bei einer Prüferentfernung von 50 cm und einem HSA von 12 mm entsteht bei einem Probanden mit einer PD von 60 mm trotz korrekt durchgeführter Messung bereits ein binokularer Messfehler von 0,51 mm. Die geometrischen Berechnungen dieses Messfehlers finden sich im Anhang. Dies würde unter anderem erklären, weshalb die Pupillendistanzen zwischen 0,15 mm und 0,60 mm größer sind als die mittels Pupillometer gemessenen. Ebenso lassen sich die angezeichneten Werte unter Verwendung einer Messschablone nur auf etwa 0,50 mm genau ablesen. Die Strichstärke von 0,40 mm des verwendeten Folienstifts ist ein weiterer Faktor, der zu Messungenauigkeiten beiträgt. Ist bereits die Pupillendistanz für die Ferne mit einem Fehler behaftet, zieht sich dieser als systematischer Fehler durch alle weiteren Messungen und Berechnungen, die darauf basieren.

Die Pupillendistanzen für die Nähe mittels Pupillometer und Spiegelmethode weisen ebenfalls geringe Abweichungen auf. Bei beiden Methoden wird die Nah-PD auf der jeweiligen Scheibenebene gemessen. Der plausibelste Grund für die vorliegenden Abweichungen ist die Tatsache, dass bei vermutlich keinem der Probanden der HSA zum Brillenglas und jener zur Scheibe des Pupillometers gleich groß war. Bei konvergent verlaufenden Fixierlinien, wie es bei der Messung der Nah-PD der Fall ist, hängt die gemessene Pupillendistanz auf Scheibenebene allerdings von dem jeweiligen HSA ab. Die oben genannten Ursachen für mögliche Messungenauigkeiten treffen beim Pupillometer auch für die Messung der Nah-PD zu. Bei der Spiegelmethode kommen ebenso die für die Viktorin-Methode

beschriebenen potenziellen Fehlerquellen in Betracht, da sich Proband und Untersucher ebenfalls gegenüber sitzen und die Pupillendistanzen auch mit einem Folienstift auf die Scheiben aufgezeichnet werden. Zusätzlich können hier weitere Messungenauigkeiten entstehen, wenn Proband und/oder Untersucher nicht exakt den gleichen Abstand zur Fixationsmarke einhalten.

Bei dem berechneten Inset nach Spiegelmethode, bezogen auf die Fernwerte nach Viktorin, und dem Inset aus den reinen Pupillometerwerten addieren sich lediglich die Fehler aus den Pupillendistanzen der Ferne und Nähe, daher bestehen auch zwischen diesen Werten Differenzen.

Bei der Ermittlung der PD-Insets mittels direkter Kameramessung treten mehrere Faktoren auf, die Messungenauigkeiten zur Folge haben können. Beim Messvorgang selbst ist trotz KSS und gewissenhafter Ausrichtung der Kamera nicht zu gewährleisten, dass bei allen Probanden eine Messentfernung zwischen Hornhautscheitel und Fixationsmarke von exakt 400 mm eingehalten wird. Die Toleranz dieser Messentfernung bewegt sich in einem Bereich von etwa ± 5 mm, woraus sich ein binokularer Fehler in der PD-Messung von etwa 0,04 mm bis 0,06 mm abschätzen lässt. Ferner haben auch leicht verdrehte Kopfhaltungen einen gewissen Einfluss auf die gemessene PD. Eine verdrehte Kopfhaltung kann trotz mittig fluchtender Linien des Messaufsatzes vorliegen, falls die Fassung nicht parallel vor den Augen sitzt. Weitere Faktoren, die das Konvergenzverhalten der Augen beeinflussen, sind unter anderem vorliegende Phorien, Fixationsdisparation und „lag of accommodation“. Dadurch können Abweichungen zu den geometrisch berechneten PD-Insets auf Irisblattebene auftreten.

Ferner ist der Strahlenverlauf durch das Kameraobjektiv nicht genauer untersucht worden. Es ist nicht bekannt, wie die Strahlen am hinteren Ende des Objektivs auf dem Bildsensor abgebildet werden. In dieser Arbeit wurde zur Vereinfachung die Baulänge des Objektivs vernachlässigt und die Annahme getroffen, dass sich der Bildsensor direkt hinter der Fixationsmarke befindet. Zudem wurde für einen möglichst großen Bildausschnitt bei allen Messungen gezoomt. Dabei wurde allerdings nicht berücksichtigt, dass bei allen Messungen die identische Brennweite gewählt wird. Daraus resultierende perspektivische Fehler und andere Abbildungsfehler der Optik – wie beispielsweise die Verzeichnung – nehmen ebenfalls Einfluss auf die Größe der gemessenen Pupillendistanz. Dass Kamerafehler bestehen, ist aus den Messungen am Kunstkopf bekannt, da hier nicht die

tatsächlich vorhandene Pupillendistanz von 68,50 mm ermittelt wurde. Für die Probanden konnte allerdings keine Korrekturformel hergeleitet werden, da diese in den verschiedenen Messentfernungen – im Gegensatz zum Kunstkopf – unterschiedliche Augenstellungen einnehmen. Um den durch Verzeichnung entstehenden Messfehler zu korrigieren, könnte beispielsweise ein quadratisches Gitter in der Messentfernung von 400 mm fotografiert werden und aus dem Bild ein ortsabhängiger Korrekturfaktor für die Verzeichnung ermittelt werden. Da dies allerdings nicht durchgeführt wurde, wurde dieser Kamerafehler bei den Auswertungen der Werte der Probanden vernachlässigt.

Weiter erfolgt bei der Auswertung der Fotos die Bestimmung der Pupillenmitten nach Augenmaß des Untersuchers. Auch hier kam es zu gewissen Schwankungen der Einzelmessungen, wie den Standardabweichungen der einzelnen Messreihen zu entnehmen ist. Für die Herleitung der „Formel“ zur Korrektur des perspektivischen Fehlers wurde zur Vereinfachung angenommen, dass sich der Referenzsteg um die Strecke des HSA näher an der Kamera befindet als die Irisebene. Das genaue Streckenverhältnis zwischen Kamera und Referenzsteg beziehungsweise Iris ist sehr schwierig bestimmbar, da hier auch Faktoren wie Fassungsmaße, Inklination, Messwinkel und HSA mit einfließen. Selbst die Messung des HSA ist aufgrund von Basiskurve des Brillenglases und Parallaxenfehlern relativ ungenau, sodass der gemessene HSA durchaus um ± 1 mm vom tatsächlichen HSA abweichen kann. Bei der Korrektur des perspektivischen Fehlers macht eine Streckendifferenz von 3 mm bereits mehrere Zehntelmillimeter bei der Umrechnung der Nah-PD aus. Bei dieser Korrektur entstehen bisher nicht berechenbare Fehler aufgrund der nicht eindeutig bekannten Strecken.

Auch die Strecke der Vorderkammertiefe ist lediglich eine Annahme des Augenmodells nach Gullstrand. Diese variiert allerdings zwischen den Probanden, da nicht zuletzt auch verschiedene Fehlsichtigkeiten vorliegen. Prinzipiell sollte das für die Umrechnung des perspektivisch korrigierten PD-Insets sowie für die Berechnungen der geometrischen Insets auf Brillenglas- und Irisblattebene berücksichtigt werden. Bei der Strecke e_z zwischen Hornhaut und dem Augendrehpunkt Z' wird zwar die jeweilige vorliegende Fehlsichtigkeit der Probanden berücksichtigt, allerdings handelt es sich bei dem Ausgangswert von 13,5 mm ebenfalls nur um eine angenommene Strecke des Augenmodells. Entsprechen

diese angenommenen Strecken nicht den tatsächlichen Gegebenheiten der Augen der Probanden, sind die resultierenden Berechnungen nicht ganz korrekt, wodurch beim Vergleich der gemessenen mit den berechneten Insets falsche Rückschlüsse gezogen werden könnten. Ebenso sind die Berechnungen mit einem Fehler behaftet, falls die dazu herangezogenen Pupillendistanzen (Ferne) bereits nicht korrekt ermittelt wurden.

Die vernachlässigte optische Dicke der verwendeten Plangläser führt ebenfalls dazu, dass die ermittelten Werte nicht ganz korrekt sind. Aus einer allgemeinen Berechnung zur Abschätzung des Fehlers ergibt sich in der Summe für beide Gläser ein optischer Versatz von etwa 0,1 mm.

Schließlich sollte angesprochen werden, dass sich vor der Iris die Cornea des Auges befindet, wodurch auf den Fotos streng genommen nicht die Iris selbst, sondern das Bild der Iris betrachtet wurde. Das heißt, es wurde bei allen Auswertungen der Kameramessungen (außer beim Kunstkopf) die Strecke zwischen den Irisbildern gemessen. Unter Berücksichtigung des Brechungsindex des Kammerwassers, der Objektweite der Iris und der Gesamtbrechkraft der Hornhaut nach Gullstrand liegt das gesehene Bild der Iris etwa 2,97 mm hinter der Hornhaut (Berechnung im Anhang). Wird davon ausgegangen, dass der perspektivisch korrigierte PD-Inset nicht auf Irisblattebene, sondern auf Irisbildebene ermittelt wurde, ergibt sich bei der Umrechnung auf Brillenglasebene durch Austausch des Wertes e_v für alle drei Probanden ein kleinerer Gesamt-Inset auf Scheibenebene. Diese Werte weichen von den Werten der geometrisch berechneten Insets auf Brillenglasebene etwas stärker ab.

Die Ergebnisse aller Messungen zeigen zudem für die drei untersuchten Probanden einen kleineren binokularen Inset von 3,21 mm bis 4,18 mm auf als der für Standard-Gleitsichtgläser verwendete Inset von insgesamt 4,0 mm bis 5,0 mm. Allerdings gibt es auch individuelle Gleitsichtgläser, deren Insets nach dem geometrischen Modell unter Berücksichtigung der Strahlenbrechung und der Glasdicke ausgeführt werden. Dadurch kann der jeweilige Gesamt-Inset dieser Gläser zwischen 1,0 mm und 4,5 mm variieren.

In Anbetracht der aufgeführten potenziellen Fehlerquellen der Messungen kann abschließend nicht genau gesagt werden, ob es sich bei den gemessenen Werten endgültig um die „wahren“ Insets der Probanden handelt. Hierzu müssten einige

zusätzliche, in diesem Kapitel beschriebene, Faktoren berücksichtigt werden und die Abbildungsfehler der Kamera beziehungsweise des Objektivs untersucht werden.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind beim Vergleich mit den berechneten theoretischen Insets in sich schlüssig und weisen Messgenauigkeiten beziehungsweise Abweichungen in einem Bereich weniger Zehntelmillimeter auf. Allerdings wurden auch einige Fehler bekannt, die mit der Messung der Pupillendistanz mittels Kamera einhergehen. Es konnten bereits einige Schlussfolgerungen gezogen werden, jedoch noch nicht zu allen Problemstellungen präzise Lösungen gefunden werden. Beispielsweise muss dringend der optische Kamerafehler in weiteren Distanzmessungen an echten Probanden untersucht werden, da jener bisher vollständig außer Acht gelassen wurde, dieser aber nachweislich vorhanden ist. Ebenso muss eine Methode gefunden werden, mit welcher der Kopfdrehungswinkel zuverlässig bestimmt werden kann, damit dessen Einfluss auf die Pupillendistanzen künftig korrigiert werden kann. Ein nächster Schritt wäre die genauere Untersuchung der monokularen Pupillendistanzen im Hinblick auf die Fertigung von Gleitsichtgläsern mit unterschiedlichen Insets bei asymmetrischer Konvergenz oder Personen mit habituell verdrehter Kopfhaltung.

Um die Messungen künftig für die Praxis bedienerfreundlicher zu gestalten, wäre eine integrierte optische Distanzmessung sowie eine direkte Ansteuerung der Kamera mit anschließender, automatischer Auswertung der Fotos oder Videosequenzen über ein Computerprogramm wünschenswert.

Literaturverzeichnis

- A AlAnazi S., A AlAnazi M., L Osuagwu U. (2013): Influence of age on measured anatomical and physiological interpupillary distance (far and near), and near heterophoria, in Arab males, Clinical Ophthalmology, Vol. 7, 711-724
- Baumbach P. (2014): Optik und Technik der Brille – Vorlesungsskript, Hochschule Aalen, Wintersemester 2014, 42, 170, 175
- Saishin M. et al. (1982): Lag of Accommodation - Advances in Diagnostic Visual Optics, Springer Verlag, Volume 41, 69-74
- Diepes H. (2004): Refraktionsbestimmung, DOZ-Verlag, 3. Auflage, 36, 379
- Diepes H., Blendowske R. (2005): Optik und Technik der Brille, Optische Fachveröffentlichungen GmbH, 2. Auflage, 75
- Dietze H., Seidel D. et al. (2008): Die optometrische Untersuchung, Georg Thieme Verlag, 1. Auflage, 108
- Dodgson N. A. (2004): Variation and extrema of human interpupillary distance, Conference Paper, Research Gate
- Frost A., Rippich N. (2015): Messung des individuellen Inset bei Probanden im Nahbereich, Bachelorarbeit, Hochschule Aalen, Wintersemester 2015
- Grehn F. (2006): Augenheilkunde, Springer Verlag, 29. Auflage, 380
- Holland B.J., Siderov J. (1999): Repeatability of measurements of interpupillary distance, Ophthalmic and Physiological Optics, Vol. 19, 74-78
- Kalder D. (2003): Gleitsichtgläser, Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie, Band 16, 22-23, 30, 50, 85
- Kaufmann H. et al. (2012): Strabismus, Georg Thieme Verlag, 4. Auflage, 118-121

- Knopp M. (2015): Zufriedene Gleitsichtkunden ... sind keine Hexerei, Der Augenoptiker, Ausgabe 10, 60-66
- Methling D. (2013): Bestimmen von Sehhilfen, Georg Thieme Verlag, 3. Auflage, 272, 275, 305
- Osuobeni E.P., Al-Fahdi M. (1994): Differences between anatomical and physiological interpupillary distance, Journal of the American Optometric Association, Vol. 65, 265-271
- VuMA Verbrauchs- und Medienanalyse (2016): Internetlink: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/171595/umfrage/besitz-von-hilfsmitteln-zur-korrektur-einer-sehschwaeche/> (letzter Zugriff am 30.05.2016)
- Walsh G., Pearce E.I. (2009): The difference between belief and reality for Viktorin's method of interpupillary distance measurement, Ophthalmic and Physiological Optics, Vol. 29, 150-154
- Wesemann W. (1996): Wo liegt die lichtenergetische „Mitte“ der Augenpupille? Betrachtungen zum Stiles-Crowford-Effekt 1.Art, Neues Optiker Journal, Ausgabe 3, 10-14
- Wesemann W. (2009): Moderne Videozentriersysteme und Pupillometer im Vergleich - Teil 2, DOZ-Verlag, Ausgabe 7, 32-39
- Wesemann W., Bartz J.-U., Arnolds P. (1997): Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit von PD-Messgeräten und Unterschiede zwischen der Zentrierung auf Pupillenmitte bzw. auf Hornhautreflex, DOZ-Verlag, Ausgabe 2, 18-22
- Wesemann W., Leitner E. (2010): DIN EN ISO 21987 „Fertig montierte Korrektionsbrillengläser“ – Die neue Norm zur Brillenglaszentrierung, DOZ-Verlag, Ausgabe 4, 51-54
- Yang Y., Thompson K., Burns S.A. (2002): Pupil location under mesopic, photopic, and pharmacologically dilated conditions, Investigative Ophthalmology & Visual Science, Vol. 43, 2508-2512

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Grafische Darstellung der Sehfeldbreite bei definierter Breite des Progressionsbereichs (Bildquelle: Kalder, D. 2003: Gleitsichtgläser, Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie, Band 16, 25).....	9
Abbildung 2	Asymmetrisch zu den Fixierlinien angeordnete Sehfelder (Bildquelle: Baumbach, P. 2014: Optik und Technik der Brille – Vorlesungsskript, Hochschule Aalen, Wintersemester 2014, 170)	10
Abbildung 3	Symmetrisch zu den Fixierlinien angeordnete Sehfelder (Bildquelle: Baumbach, P. 2014: Optik und Technik der Brille – Vorlesungsskript, Hochschule Aalen, Wintersemester 2014, 175)	10
Abbildung 4	Schematische Darstellung des Augenmodells bei Betrachtung eines nahen Objekts (Bildquelle: Kalder, D. 2003: Gleitsichtgläser, Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie, Band 16, 30).....	11
Abbildung 5	Grafische Darstellung der Konvergenzlinie bzw. Hauptsehlinie (jeweils die äußeren Linien) bei Abweichung verschiedener Parameter von der Insetlinie bzw. dem Hauptmeridian mit Standardparametern (jeweils die mittige Linie). Auswirkung der Fern-PD (links), des HSA (zweite v. links), des Scheitelbrechwerths (zweite v. rechts) und aller drei zusammen (rechts) auf die Konvergenzlinie (Bildquelle: Kalder, D. 2003: Gleitsichtgläser, Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie, Band 16, 58).....	14
Abbildung 6	Auswirkung der Vorneigung auf die notwendige Blicksenkung und den Abstand der Cornea zum Brillenglas im Nahbezugspunkt (Bildquelle: Kalder, D. 2003: Gleitsichtgläser, Wissenschaftliche Vereinigung für Augenoptik und Optometrie, Band 16, 123).....	15
Abbildung 7	Vergleich der Insets bei unterschiedlichem FSW	16
Abbildung 8	Schematische Darstellung des Panum-Areals des rechten Auges für eine korrespondierende Netzhautstelle des linken Auges (Bildquelle: Kaufmann, H. et al. 2012: Strabismus, Georg Thieme Verlag, 4. Auflage, 119)	17
Abbildung 9	Verwendete Kamera - Nikon Coolpix P7800.....	20
Abbildung 10	Verwendete LED Ringbeleuchtung R48 der Firma Kaiser	20
Abbildung 11	Montage der Ringbeleuchtung an der Kamera. Beschreibung v.l.n.r.: Außengewinde des Kameraobjektivs, Außengewinde eines mitgelieferten Adapterrings, Innengewinde des angefertigten Adapterrings, Kamera mit aufgeschraubtem Adapterring, fertig montierte Ringbeleuchtung	21
Abbildung 12	Verwendeter Fernauslöser - Hama NI-3-1.1	21
Abbildung 13	Für erste Tests verwendetes Saugnapf-Stativ der Firma Cullmann West-Germany (linke zwei) und vorläufiger Versuchsaufbau (rechte zwei)	22
Abbildung 14	Links v. oben n. unten: Plexiglasscheibe als Fixationsvorrichtung, Montage an Kamera, resultierende Bildqualität. Rechts v. oben n. unten: Fadenkreuz als Fixationsvorrichtung, Montage an der Kamera, resultierende Bildqualität	23
Abbildung 15	Vergleich von Erkennung der Fixiermarke ohne Blendung (oben), Erkennung der Fixiermarke mit Blendung (Mitte) und Erkennbarkeit der	

Pupillen (unten) für Gelbfilter (links), Blaufilter (Mitte) und ohne Filter (rechts)	24
Abbildung 16 Fertiggestelltes Adapterstück zur Montage auf dem Verschiebereiter. Ansicht von der Seite (links), Ansicht von vorne (zweite v. links), 1/4-Zoll-Schraube (zweite v. rechts) und Schraubenpositionen in der Aluminiumplatte (rechts)	26
Abbildung 17 Ausrichtung der Kamera zur Mittellinie der Führungsschiene	27
Abbildung 18 Messaufsatz bei zentrischem Aufblick (links), Länge des Dorns (zweite v. Links), Maßstab der Skala (zweite v. rechts) und Aufblick bei Kopfdrehung oder seitlichem Versatz (rechts)	28
Abbildung 19 Brillenfassungen von oben nach unten zugehörig zu Proband 1-3. Untere Fassung dient den Messungen am Kunstkopf.....	29
Abbildung 20 Vergleich der Bildqualität der Augenpartie mit Demoscheiben (links) und superentspiegelten Plangläsern (rechts)	30
Abbildung 21 Messung der Vorneigung mittels Zeiss Messinstrument	31
Abbildung 22 Messung des HSA.....	32
Abbildung 23 Messung des FSW mittels Rodenstock Messinstrument in drei Schritten	32
Abbildung 24 Verwendetes Pupillometer zur Messung der Fern-PD der Firma Towa Medical Instruments.....	33
Abbildung 25 Zentrierschablone der Firma Hoya mit Millimeterskalierung	34
Abbildung 26 Endgültig angezeichnete Fern-PD. Die Anzeichnung befindet sich im Lot	34
Abbildung 27 Spiegel mit zentral aufgezeichneter Fixationsmarke	36
Abbildung 28 Schematische Darstellung der Messung der Nah-PD bei korrekt durchgeführter Spiegelmethode.....	38
Abbildung 29 Fehlerhafte Durchführung der Spiegelmethode. Der Untersucher befindet sich nicht in gleichem Abstand zur Fixationsmarke wie der Proband.....	38
Abbildung 30 Falsche Durchführung der Spiegelmethode. Der Untersucher prüft monokular.	39
Abbildung 31 Vorläufiger Versuchsaufbau für die Messung der Nah-PD am Spiegel mittels KSS und Kamera (links). Ausrichtung des Spiegels auf der Führungsschiene (rechts). Hilfslinie des Spiegels und Mittellinie der Schiene liegen in einer Flucht	40
Abbildung 32 Messung der Nah-PD über den Spiegel unter Benutzung einer Kamera.	41
Abbildung 33 Der Proband (links im Bild) trägt Fassung mit Messaufsatz. Er fixiert die Fixationsmarke vor dem Objektiv der Kamera (rechts). Weiter zu sehen die Führungsschiene (zentral) mit Verschiebereiter sowie Fernauslöser (rechts unten)	43
Abbildung 34 Inklination der Fassung wie eingangs gemessen (links) und Inklinations- Δ um 10° für die zweite Messreihe (rechts)	44
Abbildung 35 Schematische Darstellung der direkten Kameramessung. Zusätzlich machen die eingezeichneten Pupillendistanzen den Unterschied zwischen gemessenem und benötigtem Inset deutlich, deren Differenz als potenzieller Zentrierfehler resultiert.	45

Abbildung 36 Fixationsmarke mit aufgeklebtem Landoltring (links) und Größenverhältnis zum Gesamtdurchmesser der Marke (rechts)	47
Abbildung 37 Auswertung in Paint. Links unten sind die Pixelkoordinaten der aktuellen Position des Cursors im Bild abzulesen	48
Abbildung 38 Prinzip zur Ermittlung der Pixelzahl für die zur Berechnung notwendigen Strecken in Paint	49
Abbildung 39 Referenzsteg zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors	50
Abbildung 40 Blick in die Ferne bei gerader Kopfhaltung (links) und die Auswirkung auf die monokulare Fern-PD bei einer Kopfdrehung um den Winkel β (rechts)	52
Abbildung 41 Blick in die Nähe bei gerader Kopfhaltung (links) und die Auswirkung auf die monokulare Nah-PD bei einer Kopfdrehung um den Winkel β (rechts)	52
Abbildung 42 Kontrolle der monokularen Fern-PD bei exakt gegenüberliegenden Augenpaaren zwischen Untersucher und Probanden (links) und Auswirkung auf die monokulare Fern-PD bei seitlichem Versatz zwischen Untersucher und Probanden (rechts)	53
Abbildung 43 Messung der Nah-PD mittels Kamera (links) und Auswirkung auf die monokulare Fern-PD bei seitlichem Versatz der Kamera (rechts)	53
Abbildung 44 Grafische Darstellung des Messaufsatzes aus der Ansicht von oben bei gerader Kopfhaltung (links) und bei einer Kopfdrehung um den Winkel β (rechts)	54
Abbildung 45 Strecken- und Winkelbeziehungen bei einer Kopfdrehung mit Blick in die Ferne. Kopfdrehungs-äußeres Auge (oben) und kopfdrehungs-inneres Auge (unten)	55
Abbildung 46 Strecken- und Winkelbeziehungen bei einer Kopfdrehung mit Blick in die Nähe. Kopfdrehungs-äußeres Auge (oben) und kopfdrehungs-inneres Auge (unten)	56
Abbildung 47 Seitlicher Versatz des Messaufsatzes zur Fassungsmitte	58
Abbildung 48 Kreuz und Skala des Messaufsatzes liegen perspektivisch nicht übereinander	59
Abbildung 49 Darstellung einer nicht parallel vor den Augen sitzenden Brillenfassung	60
Abbildung 50 Schematische Darstellung der Distanz zwischen Kamera und Referenzsteg bzw. Kamera und Augen	61
Abbildung 51 Streckenverhältnis zwischen Kamera und Referenzsteg bzw. Kamera und Auge in Abhängigkeit vom Messwinkel	62
Abbildung 52 Übersicht über die Auswertungen	64
Abbildung 53 Grafische Darstellung der binokularen Pupillendistanzen (Ferne) für jeden Probanden nach reinen Pupillometerwerten und nach Viktorinabgleich ..	67
Abbildung 54 Grafische Darstellung der binokularen Pupillendistanzen (Nähe) für jeden Probanden nach gemittelten Pupillometermessungen und Spiegelmethode	70
Abbildung 55 Darstellung der Insets nach reinen gemittelten Pupillometerwerten und nach Viktorin und Spiegelmethode	72
Abbildung 56 Darstellung der PD-Insets bei direkter Kameramessung am Kunstkopf bei verschiedenen Messentfernungen. Ein hypothetischer Messpunkt bei 10	

Metern Prüfdistanz soll zeigen, dass kein linearer Zusammenhang bestehen kann.....	75
Abbildung 57 Linearer Zusammenhang zwischen Messentfernung und ermittelten PD-Insets im Bereich von 400-600 mm.....	75
Abbildung 58 Relative Umrechnungsfaktoren der korrigierten Nah-PD zur tatsächlich vorhandenen PD bei verschiedenen Messentfernungen.....	76
Abbildung 59 Verteilung der Einzelmesswerte (perspektivisch korrigierte binokulare PD-Insets) innerhalb der Messreihe "Kamera direkt – Unveränderte VN".....	80
Abbildung 60 Verteilung der Einzelmesswerte (perspektivisch korrigierte binokulare PD-Insets) bei direkter Kameramessung am Kunstkopf aus verschiedenen Messentfernungen.....	80
Abbildung 61 Erforderliche Strecken zur Berechnung der geometrischen Insets.....	81
Abbildung 62 Zur Umrechnung des Insets auf Brillenglasebene erforderliche Strecken.....	83
Abbildung 63 Grafische Darstellung der ermittelten Gesamt-Insets. Im linken Diagramm die Insets auf Brillenglasebene, im rechten Diagramm die PD-Insets auf Irisblattebene.....	88
Abbildung 64 Grafische Darstellung aller ermittelten Gesamt-Insets. Zusätzlich hervorgehobene Darstellung der Insets zu den Messreihen „Kamera direkt Inklinationsdelta 10°“, „Kamera über Spiegel – KSS und habituell“ und „Kamera direkt Landoltring“.....	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht über die verschiedenen Methoden zur Messung der Nah-PD	35
Tabelle 2 Excel-Tabelle zur Auswertung der entstandenen Fotos. Im Beispiel: Proband 3, Messung bei direktem Blick in die Kamera, VN wie eingangs gemessen	51
Tabelle 3 Eingangs ermittelte Probandendaten und Individualparameter	65
Tabelle 4 Pupillendistanzen für die Ferne - gemittelt aus zehn Pupillometermessungen je Proband sowie abgeglichen nach Viktorin. Im rechten Tabellenbereich sind die Differenzen zwischen beiden Messungen dargestellt	66
Tabelle 5 Pupillendistanzen für Ferne und Nähe gemessen mittels Pupillometer. Im rechten Tabellenbereich ist der jeweilige resultierende Inset dargestellt	68
Tabelle 6 Fern-PD abgeglichen nach Viktorin und Nah-PD ermittelt durch Spiegelmethode über Kreuz. Im rechten Tabellenbereich ist der jeweilige daraus resultierende Inset dargestellt	69
Tabelle 7 Pupillendistanzen für die Nähe - gemittelt aus zehn Pupillometermessungen je Proband sowie ermittelt durch Spiegelmethode über Kreuz. Im rechten Tabellenbereich sind die Differenzen zwischen beiden Messungen dargestellt	70
Tabelle 8 Vergleich der Insets aus reinen Pupillometerwerten (links) und den Viktorin- und Spiegelmethode-Werten (Mitte). Die Differenzen sind im rechten Tabellenbereich dargestellt.	71
Tabelle 9 Berechnete PD-Insets bei direkter Fixation der Marke vor dem Objektiv bei unveränderter VN	73
Tabelle 10 Berechnete PD-Insets bei verschiedenen Messentfernungen	74
Tabelle 11 Berechnung der Umrechnungsfaktoren für die jeweilige Messentfernung..	76
Tabelle 12 Beispiel Proband 2 - Berechnung der binokularen PD-Insets einer Messreihe	79
Tabelle 13 Beispiel für Proband 2 - Ermittlung der benötigten Kenngrößen aus den PD-Inset-Werten	79
Tabelle 14 Geometrisch berechnete Insets auf Brillenglasebene und Irisebene	82
Tabelle 15 Korrigierte PD-Insets aus Kameramessung umgerechnet auf Brillenglasebene	84
Tabelle 16 Vergleich der Messwerte mit den geometrischen Insets auf Brillenglasebene und Irisblattebene	85
Tabelle 17 Vergleich der auf Brillenglasebene umgerechneten Gesamt-Insets der Kameramessungen mit den Gesamt-Insets aus Pupillometermessungen und Spiegelmethode	86

Anhang

Im Anhang finden sich detailliertere Ausführungen zum Kapitel „Akkommodation“ sowie zur Messung der Fern-PD mittels Pupillometer und zum Versuchsaufbau der Messung der Nah-PD mittels Kamera über Spiegel. Diese Beschreibungen sind für den Hauptteil dieser Arbeit zu ausführlich geschildert und tragen nicht essenziell zum Verständnis jener Kapitel bei. Ebenso befindet sich ein Beispiel-foto aus der vorangegangenen Bachelorarbeit (Frost, A., Rippich N. 2015) im Anhang, da jenes die im Hauptteil angesprochene suboptimale Bildqualität in keinem besonderen Maße weiter charakterisiert.

Darüber hinaus wurde die Spiegelmethode mittels Kamera bei statischer und habitueller Kopfhaltung durchgeführt, ferner wurden direkte Kameramessungen bei einem Inklinationsdelta von 10° durchgeführt und schließlich wurde bei Proband 3 eine weitere Messreihe bei direkter Fixation eines Landoltrings vor dem Kameraobjektiv erstellt. Diese Ergebnisse sind in sich nicht ganz schlüssig und bedürfen einer weiteren, genaueren Untersuchung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich ist. Außerdem tragen die Ergebnisse jener Messreihen nicht maßgebend zu den Erkenntnissen dieser Arbeit bei. Daher sind auch diese hinsichtlich einer besseren Übersichtlichkeit des Hauptteils – ohne genauere Wertung – dem Anhang beigelegt. Diese können bei Interesse dennoch nachgelesen werden.

Die abschließenden handschriftlichen Rechnungen sind während der gesamten Arbeitsphase und teilweise auch erst zum Ende hin entstanden und dienen lediglich zur Dokumentation der Rechenwege und der verwendeten Zahlenwerte. Falls bei den dargestellten Ergebnissen im Hauptteil Unschlüssigkeiten auftreten oder die „Herkunft“ eines bestimmten Wertes nicht ersichtlich ist, können die Rechenwege im Anhang nochmals nachvollzogen werden.

Akkommodation

Auch die vom Auge selbst aufzubringende Nahakkommodation wirkt sich auf die Konvergenzstellung der Augen aus. Der Ziliarmuskel, welcher maßgebend am Akkommodationsprozess beteiligt ist, wird durch den 3. Hirnnerv (N. oculomotorius) innerviert. Der N. oculomotorius innerviert außerdem den Pupillenschließmuskel (M. sphincter pupillae) und vier der sechs äußeren Augenmuskeln, darunter den inneren geraden (M. rectus medialis) und den unteren geraden (M. rectus inferior) Augenmuskel, welche am Konvergenzprozess beteiligt sind. Diese Muskeln sind durch einen übergeordneten neurophysiologischen Regelkreis miteinander gekoppelt, sodass bei Nahakkommodation beim Blick auf ein nahes Objekt unwillkürlich auch der Pupillenschließmuskel und der innere gerade und untere gerade Augenmuskel innerviert werden, was zu einer Verengung der Pupille und zu akkommodativer Konvergenz führt. Dieser neurophysiologische Regelkreis wird auch als Naheinstellungstrias bezeichnet (Dietze, H., Seidel, D. et al. 2008). Da die Konvergenz mit einer Zunahme der Akkommodation einhergeht, hat diese theoretisch also auch eine Auswirkung auf den benötigten Inset. Bei Betrachtung der Duanen Mittelwertskurve (Abbildung 1) lässt sich feststellen, dass der maximale Akkommodationserfolg ΔA_{max} bei Vollkorrektur der Ferne mit fortschreitendem Lebensalter geringer wird.

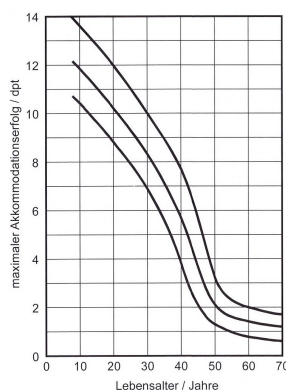


Abbildung 1 Duane Kurve - Abhängigkeit des maximalen Akkommodationserfolgs vom Lebensalter. Bestehend aus Mittelwertskurve (Mitte), unterer physiologischer Grenzwertkurve (unten) und oberer physiologischer Grenzwertkurve (oben) (Bildquelle: Diepes, H. 2004: Refraktionsbestimmung, DOZ-Verlag, 3. Auflage, 42)

Streng genommen müsste der maximale Akkommodationsaufwand ΔD_{max} der Augenlinse selbst betrachtet werden, da sich bei der Akkommodation ursächlich der Brechwert der Augenlinse verändert. Da jener aber nicht direkt messbar ist, wird in der Praxis stattdessen der maximale Akkommodationserfolg ΔA_{max} bei voll auskorrigierter Fern-Fehlsichtigkeit benutzt (Methling, D. 2013).

Messung der Fern-PD

Die Fern-PD wird zunächst mittels Pupillometer der Firma „Towa Medical Instruments“ gemessen. Dies muss sehr sorgfältig durchgeführt werden, da jene später als Ausgangswert zur Berechnung des Insets dient. Vor Beginn der Messung wird das Einstellrad auf „unendlich“ gestellt, damit die Fixierlinien beider Augen durch Prismen und Spiegel im Geräteinneren parallel verlaufen. Vorzugsweise hält der Proband während der Messung das Gerät in seinen eigenen Händen, legt die Nasenaufklammer mittig und fest auf seiner Nasenwurzel an und fixiert durch die zwei Fenster den grün leuchtenden Punkt im Gerät. Der Untersucher blickt monokular durch die gegenüberliegende Seite des Pupillometers und betrachtet die Augen des Probanden. Mittels zweier Schieber auf der Geräteaußenseite werden vom Untersucher die zwei vertikalen schwarzen Linien im Pupillometer für jedes Auge getrennt so verschoben, dass sie in der Mitte der jeweiligen Pupille liegen. Danach wird das Pupillometer wieder abgenommen und die Werte für die jeweilige monokulare Pupillendistanz in Millimeter werden vom Display abgelesen und notiert. Die Gesamt-PD für die Ferne ergibt sich aus der Summe der monokularen Pupillendistanzen. Oben beschriebener Vorgang wird zehn Mal wiederholt und die Werte arithmetisch gemittelt.

Beispielfoto aus der vorangegangenen Bachelorarbeit

Abbildung 2 zeigt eine Aufnahme des „Probanden 1“ aus den Messreihen der ehemaligen Bachelorarbeit mit dem Vorgängergerät. Hier wird bereits deutlich, dass die auswertende Person die Pupillenmitte des Probanden nur erahnen kann.



Abbildung 2 Aufnahme mit dem Vorgängergerät. Proband 1 bei zentraler Blickrichtung

Messung der Nah-PD (über Spiegel und Kamera)

In einer zusätzlichen Messung werden die Pupillendistanzen für die Nähe ein weiteres Mal über den Spiegel gemessen, mit dem Unterschied, dass der Untersucher dem Probanden nicht gegenüber sitzt und die jeweilige Pupillenposition über Kreuz auf den Brillengläsern markiert, sondern mittels Kamera jeweils zehn Fotos auslöst, während die Probanden auf die Fixationsmarke des Spiegels blicken. Der Abstand der Objektivvorderfläche zur Fixationsmarke ist dabei idealerweise identisch mit der Einstellentfernung der Probanden. Genau genommen müsste diese Entfernung bis zur Eintrittspupille des Objektivs gemessen werden, deren Lage allerdings nicht bekannt ist. Bei diesen Messungen wird theoretisch die Nah-PD auf Irisblattebene gemessen, da auf den entstandenen Bildern lediglich die Pupillen, jedoch nicht der tatsächliche Durchblickspunkt auf Brillenglasebene gesehen wird.

Es werden zwei Messreihen durchgeführt, eine bei nahezu statischer Kopfhaltung mittels Kinn-/Stirn-Stütze und eine bei habitueller Kopfhaltung ohne KSS.

Über die zehn erhaltenen Pupillendistanzen je Messreihe wird der arithmetische Mittelwert gebildet. Als Ausgangswert für die Berechnung des PD-Insets wird die nach Viktorin abgeglichene Fern-PD herangezogen, wovon die gemittelte Nah-PD subtrahiert wird. Die Ergebnisse für die erste Messreihe mittels KSS sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Berechnung des PD-Insets aus der Fern-PD nach Viktorin und der mittels Kamera über Spiegel gemessenen Nah-PD bei statischer Kopfhaltung

Proband		PD Ferne (Viktorin)			PD Nähe (Kamera über Spiegel)			PD Nähe (Kamera über Spiegel) perspektivisch korrigiert			PD-Inset (Kamera über Spiegel) perspektivisch korrigiert		
		KSS			KSS			KSS			KSS		
		Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	MW SD	30,50	29,50	60,00	29,93 0,05	28,59 0,11	58,52 0,09	30,34	28,99	59,33	0,16	0,51	0,67
2	MW SD	31,50	32,50	64,00	30,74 0,12	31,24 0,09	61,99 0,08	31,25	31,76	63,00	0,25	0,74	1,00
3	MW SD	32,00	31,00	63,00	30,36 0,09	30,61 0,09	60,96 0,04	30,90	31,15	62,04	1,10	-0,15	0,96
4	MW SD	34,50	34,00	68,50	34,37 0,01	33,53 0,02	67,90 0,02	34,63	33,78	68,41	-0,13	0,22	0,09

Bei genauer Betrachtung der Werte lässt sich bereits feststellen, dass die binokularen PD-Insets deutlich kleiner sind als jene aus den vorangegangenen Messungen.

Die Ergebnisse der zweiten Messreihe bei habitueller Kopfhaltung *ohne* KSS sind in Tabelle 3 dargestellt. Auch hier wird die gemittelte Nah-PD aus den zehn Einzelmessungen von der Fern-PD nach Viktorin subtrahiert, was zu den jeweiligen Insets führt. Am Kunstkopf wurden in habitueller Kopfhaltung keine Messungen durchgeführt. Jener besitzt ausschließlich eine statische Kopfhaltung.

Tabelle 3 Berechnung der binokularen PD-Insets aus der Fern-PD nach Viktorin und der mittels Kamera über Spiegel gemessenen Nah-PD bei habitueller Kopfhaltung

Proband		PD Ferne (Viktorin)			PD Nähe (Kamera über Spiegel)			PD Nähe (Kamera über Spiegel) perspektivisch korrigiert			PD-Inset (Kamera über Spiegel) perspektivisch korrigiert		
		Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	MW SD	30,50	29,50	60,00	29,70 0,08	28,12 0,08	57,83 0,04	30,12	28,51	58,63	0,38	0,99	1,37
2	MW SD	31,50	32,50	64,00	29,70 0,10	31,97 0,09	61,67 0,06	30,19	32,49	62,69	1,31	0,01	1,31
3	MW SD	32,00	31,00	63,00	30,64 0,08	30,30 0,06	60,94 0,09	31,19	30,83	62,02	0,81	0,17	0,98
4	MW SD	34,50	34,00	68,50	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --	-- --

Theoretisch sollte der binokulare PD-Inset zwischen den Messungen bei statischer und habitueller Kopfhaltung gleich sein. Beim Vergleich der Werte lässt sich allerdings feststellen, dass dennoch Unterschiede bestehen. Nach dem t-Test besteht zwischen diesen Werten allerdings kein signifikanter Unterschied ($t = 2,146$; $t_{2; 0,05} = 4,303$). Für diesen Vergleich werden die Insets bei statischer Kopfhaltung von jenen bei habitueller Kopfhaltung subtrahiert und in Tabelle 4 dargestellt. Aus dieser Gegenüberstellung ist der Kunstkopf aus oben genanntem Grund ausgeschlossen.

Tabelle 4 Vergleich der PD-Insets bei habitueller und statischer Kopfhaltung

Proband	PD-Inset (Kamera über Spiegel) perspektivisch korrigiert			PD-Inset (Kamera über Spiegel) perspektivisch korrigiert			Differenz (Kamera über Spiegel)		
	KSS			Habituell			Habituell - KSS		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	0,16	0,51	0,67	0,38	0,99	1,37	0,23	0,48	0,71
2	0,25	0,74	1,00	1,31	0,01	1,31	1,06	-0,74	0,32
3	1,10	-0,15	0,96	0,81	0,17	0,98	-0,29	0,32	0,02
4	-0,13	0,22	0,09	--	--	--	--	--	--

Einzig bei Proband 3 stimmen die binokularen PD-Insets nahezu überein. Bei den ersten beiden Probanden besteht eine relativ große Differenz zwischen den gesamten PD-Insets. Zur Veranschaulichung sind jene beider Messreihen in Abbildung 3 grafisch dargestellt. Hier wird nochmals sichtbar, dass die PD-Insets bei habitueller Kopfhaltung (blau) größer sind als jene bei statischer Kopfhaltung (orange).

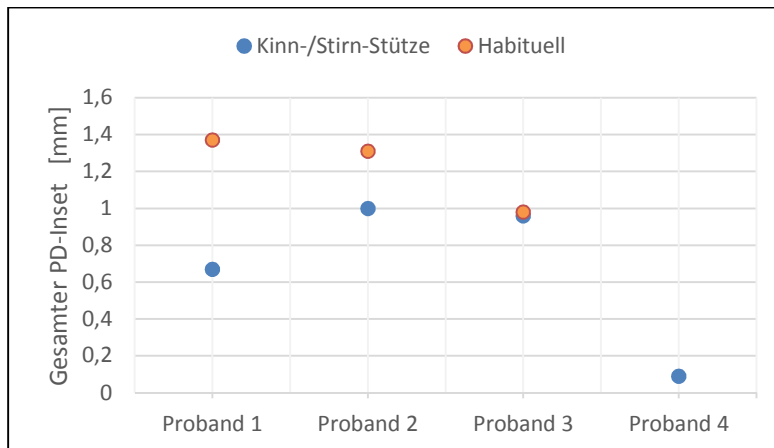


Abbildung 3 Grafische Darstellung der binokularen PD-Insets bei habitueller und statischer Kopfhaltung mittels KSS

Messung der Nah-PD (Kamera direkt – Inklinationsdelta 10°)

Es werden je Proband zwei Messreihen durchgeführt, eine bei eingangs gemessener VN und eine Weitere bei einem Inklinationsdelta von 10°. Da sich bei einer stärkeren Inklination der Abstand zwischen Cornea und Brillenglas im unteren Bereich des Brillenglases verkürzt, sollte der gemessene Inset kleiner werden. Da allerdings nicht die Durchblickspunkte auf Brillenglasebene, sondern lediglich die Pupillen selbst auf den Fotos zu sehen sind, sollte es keinen Unterschied zwischen den Messungen bei unterschiedlichen Vorneigungen geben.

Die Ergebnisse der zweiten Messreihe bei einem Inklinationsdelta von 10° werden in Tabelle 5 dargestellt. Wie bereits beschrieben, müsste der Inset auf Brillenglasebene kleiner werden, beziehungsweise auf Irisebene gleich bleiben. Bei Betrachtung der Werte lässt sich hingegen feststellen, dass der PD-Inset sogar bei allen drei Probanden größer ist. Die Ursache hierfür ist vermutlich der optische

Versatz, der durch die verwendeten Plangläser entsteht. Der Kunstkopf wurde in dieser Untersuchung nicht gemessen.

Tabelle 5 Berechnete PD-Insets bei direkter Fixation der Marke vor dem Objektiv bei einem Inklinations- Δ von 10°

Proband		PD Ferne (Viktorin)			PD Nähe (Kamera direkt)			PD Nähe (Kamera direkt) perspektivisch korrigiert			PD-Inset (Kamera direkt) perspektivisch korrigiert		
		Inklinations- Δ 10°			Inklinations- Δ 10°			Inklinations- Δ 10°			Inklinations- Δ 10°		
		Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	MW SD	30,50	29,50	60,00	28,83 0,05	27,84 0,03	56,68 0,03	29,64	28,62	58,27	0,86	0,88	1,73
2	MW SD	31,50	32,50	64,00	29,65 0,08	30,46 0,06	60,11 0,04	30,64	31,47	62,11	0,86	1,03	1,89
3	MW SD	32,00	31,00	63,00	29,30 0,05	29,40 0,07	58,70 0,04	30,36	30,45	60,81	1,64	0,55	2,19
4	MW SD	34,50	34,00	68,50	-- --	-- --	-- --	--	--	--	--	--	--

Die Differenz zwischen den PD-Insets beider Messreihen ist in Tabelle 6 dargestellt. Hierzu wird der Inset bei unveränderter VN von jenem bei Inklinationsdelta 10° subtrahiert. Zwischen beiden Messungen besteht ein signifikanter Unterschied ($t = 4,846$; $t_{2; 0,05} = 4,303$).

Tabelle 6 Berechnete Differenz der PD-Insets bei den direkten Kameramessungen verschiedener VN

Proband	PD-Inset (Kamera direkt) perspektivisch korrigiert			PD-Inset (Kamera direkt) perspektivisch korrigiert			Differenz (Kamera direkt)		
	Unveränderte VN			Inklinations- Δ 10°			Inkl- Δ 10° - Unveränderte VN		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
1	1,41	-0,08	1,31	0,86	0,88	1,73	-0,55	0,96	0,43
2	0,95	0,68	1,63	0,86	1,03	1,89	-0,09	0,34	0,26
3	1,31	0,22	1,53	1,64	0,55	2,19	0,33	0,33	0,65
4	0,62	0,81	1,43	--	--	--	--	--	--

Die PD-Insets der beiden Messungen sind nochmals in Abbildung 4 dargestellt.

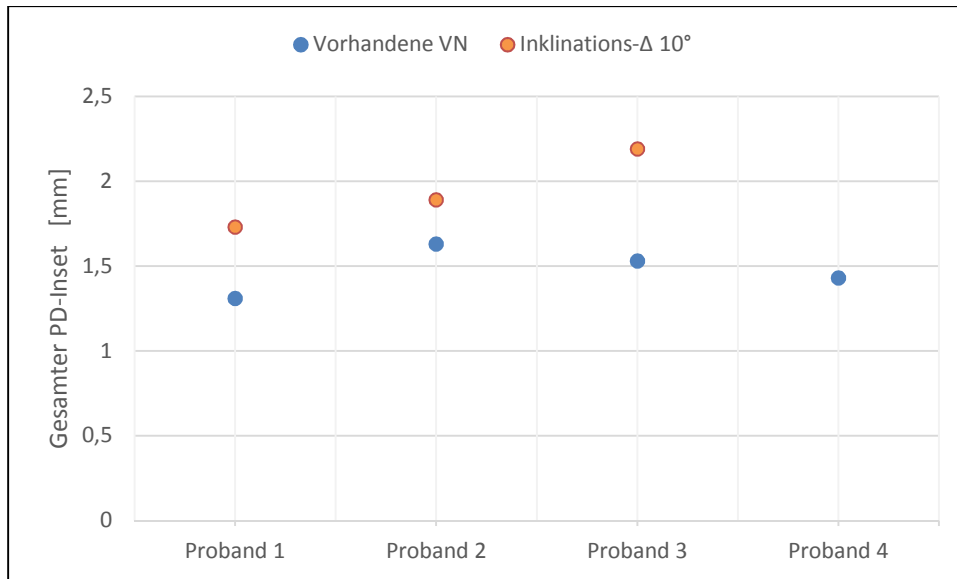


Abbildung 4 Darstellung der PD-Insets bei den direkten Kameramessungen, bei eingangs gemessener VN und bei Inklinations- Δ 10°

Messung der Nah-PD (Kamera direkt – mit Landoltring)

Bei Proband 3 wird eine zusätzliche Messreihe durchgeführt, um die Messergebnisse auf einen Zusammenhang zwischen Visusanforderung und aufgebrachter Konvergenz zu prüfen. Dazu wird exakt, wie in der letzten Messung, bei eingangs gemessener VN vorgegangen. Ferner wird ein Landoltring auf die Fixiermarke geklebt, dessen Orientierung zwischen jeder der zehn Aufnahmen geändert wird. Die Ergebnisse dieser Messreihe sind in Tabelle 7 dargestellt. Als Ausgangswert dient wieder die Fern-PD nach Viktorin; die Nah-PD ist über alle zehn Messungen gemittelt.

Tabelle 7 Berechneter PD-Inset bei direkter Fixation der Marke vor dem Objektiv. Ein zusätzlich angebrachter Landoltring erhöht die Visusanforderung

Proband 3	PD Ferne (Viktorin)			PD Nähe (Kamera direkt)			PD Nähe (Kamera direkt) <i>perspektivisch korrigiert</i>			PD-Inset (Kamera direkt) <i>perspektivisch korrigiert</i>		
				Landoltring			Landoltring			Landoltring		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
MW SD	32,00	31,00	63,00	29,50 0,08	30,00 0,07	59,50 0,05	30,56	31,08	61,64	1,44	-0,08	1,36

Zum Vergleich wird der PD-Inset von Proband 3 der gleichen Kameramessung ohne Landoltring gegenübergestellt. Der PD-Inset mit Landoltring wird von jenem ohne Landoltring subtrahiert. Die Differenz ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 Berechnete Differenz der PD-Insets zwischen der Messung ohne Landoltring und mit Landoltring

Proband 3	PD-Inset (Kamera direkt) <i>perspektivisch korrigiert</i>			PD-Inset (Kamera direkt) <i>perspektivisch korrigiert</i>			Differenz (Kamera direkt)		
	Ohne Landoltring			Mit Landoltring			Ohne Landoltring - Mit Landoltring		
	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]	Rechts [mm]	Links [mm]	Gesamt [mm]
	1,31	0,22	1,53	1,44	-0,08	1,36	-0,13	0,30	0,17

Aus den zehn Einzelmessungen ergibt sich zwischen beiden Messreihen ein signifikanter Unterschied ($t = 10,221$; $t_{9; 0,05} = 2,262$). Theoretisch besteht die Überlegung, dass durch eine höhere Visusanforderung mehr Akkommodation aufgebracht werden muss und somit mehr akkommodative Konvergenz ausgelöst wird. Dies ist bei vorliegenden Messergebnissen allerdings nicht der Fall. Der PD-Inset mit höherer Visusanforderung ist in dieser Messung kleiner als jener mit niedrigerer Visusanforderung.

Genauigkeit innerhalb der Messreihen

Die Verteilung der Messergebnisse für die direkte Kameramessung bei einem Inklinationsdelta von 10° ist in Abbildung 6 dargestellt. Bei dieser Untersuchung wurde der Kunstkopf nicht gemessen. Die Streuung der Einzelwerte ist bei allen drei Probanden in etwa gleich und liegt in einem Bereich von etwa 0,06 mm. Allerdings sind die binokularen PD-Insets bei allen dreien größer als bei gleicher Messung ohne Inklinationsdelta.

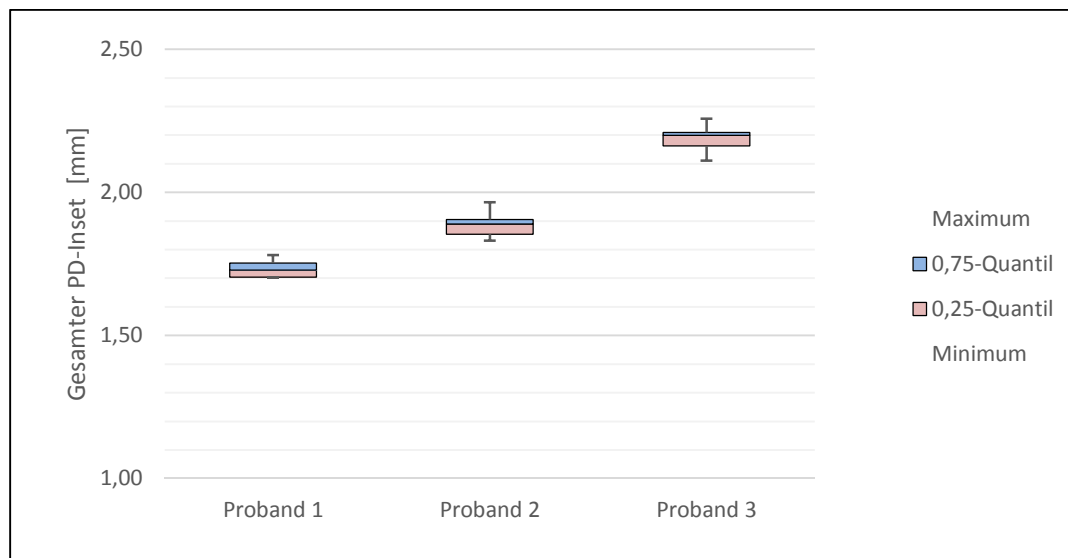


Abbildung 6 Verteilung der Einzelmesswerte (perspektivisch korrigierte binokulare PD-Insets) innerhalb der Messreihe "Kamera direkt – Inklinations- $\Delta 10^\circ$ "

Die Streuung der Messergebnisse der direkten Kameramessung mit Landoltring ist Abbildung 7 zu entnehmen. Hier wurde lediglich Proband 3 gemessen. Zum direkten Vergleich sind rechts daneben nochmals die Ergebnisse aus der gleichen Messung ohne Landoltring von Proband 3 dargestellt. Jene beziehen sich auf die Messung bei unveränderter VN. Die zentralen 50% der zehn gemessenen PD-Insets liegen bei beiden Untersuchungen in einem Bereich von etwa 0,08 mm.

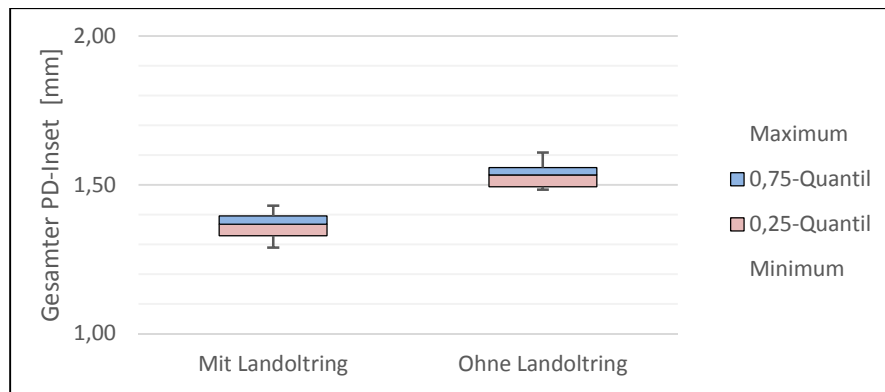


Abbildung 7 Verteilung der Einzelmesswerte (binokulare PD-Insets) für Proband 3 innerhalb der Messreihe „Kamera direkt – mit Landoltring“ und zum Vergleich der gleichen Messreihe ohne Landoltring

Messgenauigkeit im Bild

$$\text{Auflösung eines Pixels im Bild} = \frac{\text{Pixel pitch}}{\text{Vergrößerung}}$$

Vergrößerung β' :

$$f' = \frac{\beta'}{1 - \beta'} \cdot a$$

$$\beta' = \frac{f'}{a} \cdot (1 - \beta')$$

$$\beta' = \frac{f'}{a} - \frac{f'}{a} \cdot \beta'$$

$$\frac{f'}{a} = \beta' - \frac{f'}{a} \cdot \beta'$$

$$\frac{f'}{a} = \beta' \cdot \left(1 - \frac{f'}{a}\right)$$

$$\beta' = \frac{\frac{f'}{a}}{1 - \frac{f'}{a}}$$

Pixelpitch Nikon P7800:

1/1,7" CMOS-Sensor

$$\Rightarrow 7,6 \times 5,6 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow 4000 \times 3000 \text{ pix}$$

$$\Rightarrow \boxed{\text{Pixelpitch: } 1,9 \mu\text{m}}$$

$$f' = +22 \text{ mm} ; a = -400 \text{ mm}$$

$$\beta' = \frac{\frac{22 \text{ mm}}{-400 \text{ mm}}}{1 - \frac{22 \text{ mm}}{-400 \text{ mm}}}$$

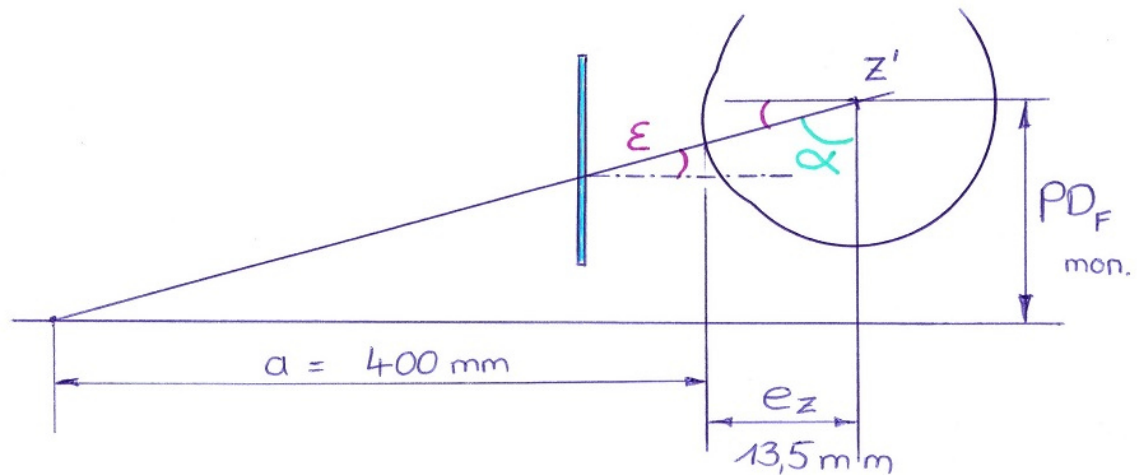
$$\boxed{\beta' = -0,052133}$$

Auflösung eines Pixels

$$\underline{\underline{(\text{Messgenauigkeit}) \text{ im Bild}}} = \frac{0,0019 \text{ mm}}{-0,052133} = \underline{\underline{\pm 0,0364 \text{ mm}}}$$



Optischer Versatz durch Planglas



Werte zu Abschätzen: $PD_{F_{mon}} = 31 \text{ mm}$

$$d_{Bgl} = 2 \text{ mm}$$

$$n_{Bgl} = 1,5$$

$$\alpha = \arctan \frac{413,5}{31}$$

$$\alpha = 85,71^\circ \Rightarrow \underline{\underline{\epsilon = 90^\circ - \alpha = 4,29^\circ}}$$

$$\Delta = d \cdot \sin \epsilon \cdot \left(1 - \frac{\cos \epsilon}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \epsilon}} \right)$$

$$\Delta = 2 \text{ mm} \cdot \sin(4,29) \cdot \left(1 - \frac{\cos(4,29)}{\sqrt{1,5^2 - \sin^2(4,29)}} \right)$$

$$\Delta = 0,05 \text{ mm} \quad (\text{monokular})$$

$$\underline{\underline{\Delta = 0,10 \text{ mm}}} \quad (\text{binokular}) \quad \text{Optischer Versatz}$$

Fehler unterschiedlicher PDs zw.

Proband 1: HSA = 11 mm , PD = 59,45 mm (Pup. meter)

$$\frac{PD}{2} = 29,725 \text{ mm}$$

$$x = (11 \text{ mm} + 13,5 \text{ mm}) \cdot \frac{(35 - 29,725) \text{ mm}}{500 \text{ mm}}$$

$$x = 0,26 \text{ mm} \quad (\text{monokular})$$

$$\underline{\underline{0,52 \text{ mm}}} \quad (\text{binokular})$$

Proband 2: HSA = 13 mm , PD = 63,50 mm (Pup. met.)

$$\frac{PD}{2} = 31,75 \text{ mm}$$

$$x = (13 \text{ mm} + 13,5 \text{ mm}) \cdot \frac{(35 - 31,75) \text{ mm}}{500 \text{ mm}}$$

$$x = 0,17 \text{ mm} \quad (\text{monokular})$$

$$\underline{\underline{0,34 \text{ mm}}} \quad (\text{binokular})$$

Proband 3: HSA = 14 mm , PD = 62,40 mm (Pup. met.)

$$\frac{PD}{2} = 31,20 \text{ mm}$$

$$X = (14 \text{ mm} + 13,5 \text{ mm}) \cdot \frac{(35 - 31,20) \text{ mm}}{500 \text{ mm}}$$

$$X = 0,21 \text{ mm} \quad (\text{monokular})$$

$$\underline{\underline{0,42 \text{ mm}}} \quad (\text{binokular})$$

Proband 4: HSA = 10 mm , PD = 68,35 mm (Pup. met.,
(Kunstkopf)

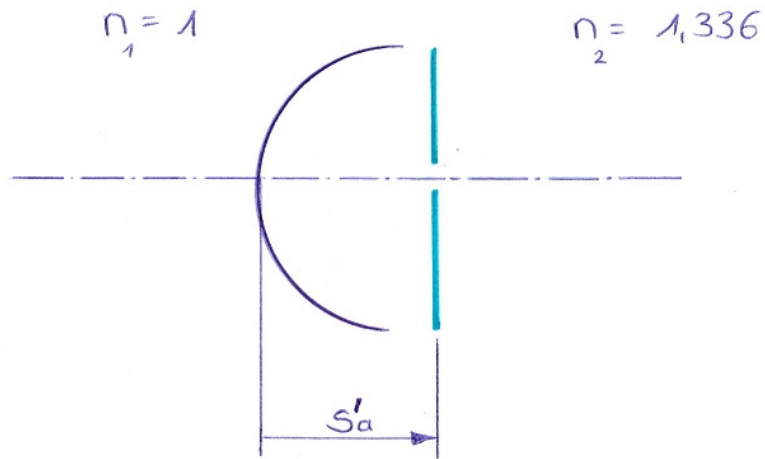
$$\frac{PD}{2} = 34,175 \text{ mm}$$

$$X = (10 \text{ mm} + e_z (=0)) \cdot \frac{(35 - 34,175) \text{ mm}}{500 \text{ mm}}$$

$$X = 0,02 \text{ mm} \quad (\text{monokular})$$

$$\underline{\underline{0,04 \text{ mm}}} \quad (\text{binokular})$$

Lage des Irisbildes



$$\left. \begin{array}{l} F_{HH} = +43 \text{ dpt} \\ s'_a \approx 3.52 \text{ mm} \end{array} \right\} \text{Gullstrand}$$

$$\frac{n_2}{s'_a} - \frac{n_1}{s_a} = F = \frac{n_2}{f'}$$

$$s_a = \frac{n_1}{\frac{n_2}{s'_a} - F}$$

$$s_a = \frac{1}{\frac{1.336}{0.00352 \text{ m}} - 43 \text{ dpt}}$$

$$\underline{s_a} = 0.00297 \text{ m} = \underline{2.97 \text{ mm}}$$

auf Brillenglas ebene (HSA)

Proband 1: HSA = 11 mm

$$R: -1,00 \quad -1,00 \quad 105^\circ \quad S\ddot{A}: -1,50$$

$$L: -1,25 \quad -0,50 \quad 75^\circ \quad S\ddot{A}: -1,50$$

$$b' = HSA + \left(13,5 - 0,2 \cdot \frac{S\ddot{A}}{dpt} \right)$$

R:

$$b' = 11 \text{ mm} + \left(13,5 - 0,2 \cdot \frac{-1,50}{dpt} \right)$$

$$b' = 11 \text{ mm} + 13,8 \text{ mm}$$

e_z

$$\underline{b' = 24,8 \text{ mm}}$$

$$\underline{P_R = 30,5 \text{ mm}}$$

$$\text{Inset}_{\text{Bgl}} = 24,8 \cdot \frac{30,5}{413,8} \text{ mm}$$

$$= \underline{\underline{1,83 \text{ mm}}}$$

L:

$$b' = 11 \text{ mm} + \left(13,5 - 0,2 \cdot \frac{-1,50}{dpt} \right)$$

$$b' = 11 \text{ mm} + 13,8 \text{ mm}$$

e_z

$$\underline{b' = 24,8 \text{ mm}}$$

$$\underline{P_L = 29,5 \text{ mm}}$$

$$\text{Inset}_{\text{Bgl}} = 24,8 \cdot \frac{29,5}{413,8} \text{ mm}$$

$$= \underline{\underline{1,77 \text{ mm}}}$$

$$\underline{\underline{\Sigma = 3,60 \text{ mm}}}$$

Proband 2:HSA = 13 mm

$$R: -5,00$$

$$S''_A: -5,00$$

$$L: -4,00 \quad -1,75 \quad 175^\circ$$

$$S''_A: -4,875$$

R:

L:

$$b' = 13 \text{ mm} + \left(13,5 - 0,2 \cdot \frac{-5}{d_{pt}} \right)$$

$$b' = 13 \text{ mm} + \left(13,5 - 0,2 \cdot \frac{-4,875}{d_{pt}} \right)$$

$$b' = 13 \text{ mm} + 14,5 \text{ mm}$$

e_z

$$b' = 13 \text{ mm} + 14,475 \text{ mm}$$

e_z

$$\underline{b' = 27,5 \text{ mm}}$$

$$\underline{b' = 27,475 \text{ mm}}$$

$$\underline{P_R = 31,5 \text{ mm}}$$

$$\underline{P_L = 32,5 \text{ mm}}$$

$$\text{Inset}_{Bgl} = 27,5 \cdot \frac{31,5}{414,5} \text{ mm}$$

$$\text{Inset}_{Bgl} = 27,475 \cdot \frac{32,5}{414,475} \text{ mm}$$

$$= \underline{\underline{2,09 \text{ mm}}}$$

$$= \underline{\underline{2,15 \text{ mm}}}$$

$$\underline{\underline{\Sigma = 4,24 \text{ mm}}}$$

Proband 3:HSA = 14 mm

$$R: \quad -0,75 \quad -0,25 \quad 165^\circ$$

$$S\ddot{A}: \quad -0,875$$

$$L: \quad -1,25 \quad -0,25 \quad 5^\circ$$

$$S\ddot{A}: \quad -1,375$$

R:

L:

$$b' = 14 \text{ mm} + \left(13,5 \text{ mm} - 0,2 \cdot \frac{-0,875}{d_{pt}} \right)$$

$$b' = 14 \text{ mm} + \left(13,5 - 0,2 \cdot \frac{-1,375}{d_{pt}} \right)$$

$$b' = 14 \text{ mm} + 13,675 \text{ mm}$$

$$e_z$$

$$b' = 14 \text{ mm} + 13,775 \text{ mm}$$

$$e_z$$

$$\underline{b' = 27,675 \text{ mm}}$$

$$\underline{b' = 27,775 \text{ mm}}$$

$$\underline{P_R = 32 \text{ mm}}$$

$$\underline{P_L = 31 \text{ mm}}$$

$$\text{Inset}_{\text{Bgl}} = 27,675 \cdot \frac{32}{413,675} \text{ mm}$$

$$\text{Inset}_{\text{Bgl}} = 27,775 \cdot \frac{31}{413,775} \text{ mm}$$

$$= \underline{\underline{2,14 \text{ mm}}}$$

$$= \underline{\underline{2,08 \text{ mm}}}$$

$$\underline{\underline{\Sigma = 4,22 \text{ mm}}}$$

auf Irisblattebene ($e_v = 3,52 \text{ mm}$)

Proband 1:

$$R: e_z = 13,8 \text{ mm}, \quad P_R = 30,5 \text{ mm}$$

$$L: e_z = 13,8 \text{ mm}, \quad P_L = 29,5 \text{ mm}$$

R:

$$\text{Inset}_{\text{iris}} = (13,8 - 3,52) \cdot \frac{30,5}{413,8} \text{ mm}$$

$$= \underline{\underline{0,76 \text{ mm}}}$$

L:

$$\text{Inset}_{\text{iris}} = (13,8 - 3,52) \cdot \frac{29,5}{413,8} \text{ mm}$$

$$= \underline{\underline{0,73 \text{ mm}}}$$

$$\underline{\underline{\Sigma = 1,49 \text{ mm}}}$$

Irisbildebene ($e_{\text{bild}} = 2,97 \text{ mm}$):

$$\text{Inset}_{\text{Irisbild}} = (13,8 - 2,97) \cdot \frac{30,5}{413,8} \text{ mm}$$

$$= \underline{\underline{0,79 \text{ mm}}}$$

$$\text{Inset}_{\text{Irisblatt}} = (13,8 - 2,97) \cdot \frac{29,5}{413,8} \text{ mm}$$

$$= \underline{\underline{0,77 \text{ mm}}}$$

$$\underline{\underline{\Sigma = 1,56 \text{ mm}}}$$

Proband 2 :

$$R : e_z = 14,5 \text{ mm} , P_R = 31,5 \text{ mm}$$

$$L : e_z = 14,475 \text{ mm} , P_L = 32,5 \text{ mm}$$

R:	L:
$\text{Inset}_{\text{Iris}} = (14,5 - 3,52) \cdot \frac{31,5}{414,5} \text{ mm}$ $= \underline{\underline{0,83 \text{ mm}}}$	$\text{Inset}_{\text{Iris}} = (14,475 - 3,52) \cdot \frac{32,5}{414,475} \text{ mm}$ $= \underline{\underline{0,86 \text{ mm}}}$

$$\underline{\underline{\Sigma = 1,69 \text{ mm}}}$$

Irisbildebene ($e_{\text{bild}} = 2,97 \text{ mm}$) :

$\text{Inset}_{\text{Irisbild}} = (14,5 - 2,97) \cdot \frac{31,5}{414,5} \text{ mm}$ $= \underline{\underline{0,88 \text{ mm}}}$	$\text{Inset}_{\text{Irisbild}} = (14,475 - 2,97) \cdot \frac{32,5}{414,475} \text{ mm}$ $= \underline{\underline{0,90 \text{ mm}}}$
--	--

$$\underline{\underline{\Sigma = 1,78 \text{ mm}}}$$

Proband 3:

$$R: \quad e_z = 13,675 \text{ mm} \quad , \quad P_R = 32 \text{ mm}$$

$$L: \quad e_z = 13,775 \text{ mm} \quad , \quad P_L = 31 \text{ mm}$$

R:

$$\begin{aligned} \text{Inset}_{\text{Iris}} &= (13,675 - 3,52) \cdot \frac{32}{43,675} \text{ mm} \\ &= \underline{\underline{0,79 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

L:

$$\begin{aligned} \text{Inset}_{\text{Iris}} &= (13,775 - 3,52) \cdot \frac{31}{43,775} \text{ mm} \\ &= \underline{\underline{0,77 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{\Sigma = 1,56}}$$

Irisbildebene ($e_{\text{bild}} = 2,97 \text{ mm}$) :

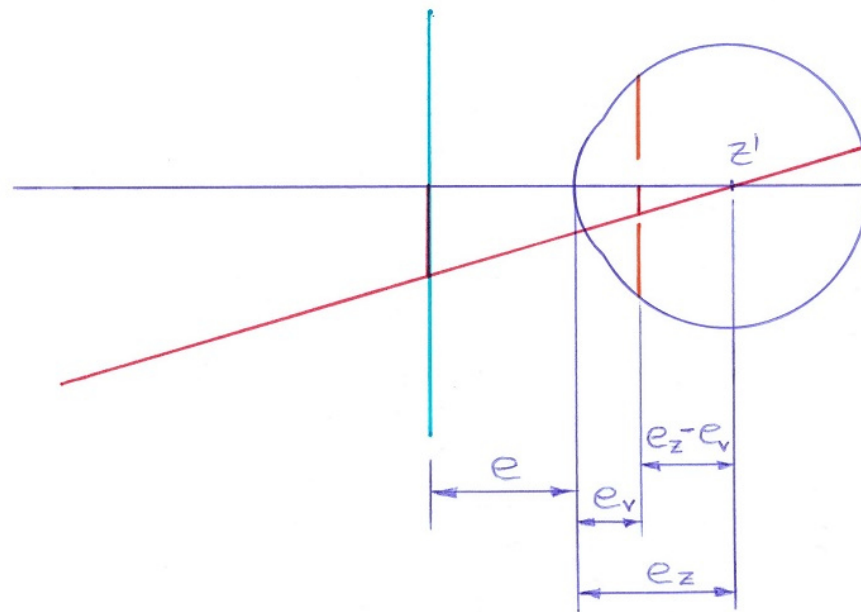
$$\begin{aligned} \text{Inset}_{\text{Irisbild}} &= (13,675 - 2,97) \cdot \frac{32}{43,675} \text{ mm} \\ &= \underline{\underline{0,83 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Inset}_{\text{Irisbild}} &= (13,775 - 2,97) \cdot \frac{31}{43,775} \text{ mm} \\ &= \underline{\underline{0,81 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{\Sigma = 1,64 \text{ mm}}}$$

Umrechnung der Nah-PD (Rohdaten)
auf Brillenglasenebene ; inkl. perspekt.

Korrektur



perspekt.
Korrektur

$$\text{Inset}_{B_{gl}} = (e + e_z) \cdot \frac{PD_F - PD_{N, \text{Foto}} \cdot \frac{a + e_v}{(a + e_v) - e}}{e_z - e_v}$$

Proband 1: HSA = 11 mm aus Fotos
↓

R: $e_z = 13,8 \text{ mm}$; $P_F = 30,5 \text{ mm}$; $P_N = 28,30 \text{ mm}$

L: $e_z = 13,8 \text{ mm}$; $P_F = 29,5 \text{ mm}$; $P_N = 28,77 \text{ mm}$

② Von Irisblatt:

$$\begin{aligned} \textcircled{R}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (11 + 13,8) \cdot \frac{30,5 - 28,30 \cdot \frac{400 + 3,52}{(400 + 3,52) - 11}}{13,8 - 3,52} \\ &= \underline{\underline{3,40 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{L}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (11 + 13,8) \cdot \frac{29,5 - 28,77 \cdot \frac{400 + 3,52}{(400 + 3,52) - 11}}{13,8 - 3,52} \\ &= \underline{\underline{-0,19 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

② Von Irisbild:

$$\begin{aligned} \textcircled{R}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (\dots) \cdot \frac{\dots \cdot \frac{400 + 2,97}{(400 + 2,97) - 11}}{13,8 - 2,97} \\ &= \underline{\underline{3,22 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{L}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (\dots) \cdot \frac{\dots \cdot \frac{400 + 2,97}{(400 + 2,97) - 11}}{13,8 - 2,97} \\ &= \underline{\underline{-0,18 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

Proband 2: HSA = 13 mm

R: $e_z = 14,5 \text{ mm}$; $P_F = 31,5 \text{ mm}$; $P_N = 29,57 \text{ mm}$

L: $e_z = 14,475 \text{ mm}$; $P_F = 32,5 \text{ mm}$; $P_N = 30,79 \text{ mm}$

② Von Irisblatt:

$$\begin{aligned} \textcircled{R}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (13 + 14,5) \cdot \frac{31,5 - 29,57 \cdot \frac{400 + 3,52}{(400 + 3,52) - 13}}{14,5 - 3,52} \\ &= \underline{\underline{2,38 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{L}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (13 + 14,475) \cdot \frac{32,5 - 30,79 \cdot \frac{400 + 3,52}{(400 + 3,52) - 13}}{14,475 - 3,52} \\ &= \underline{\underline{1,71 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

③ Von Irisbild:

$$\begin{aligned} \textcircled{R}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (\dots) \cdot \frac{\dots \cdot \frac{400 + 2,97}{(400 + 2,97) - 13}}{14,5 - 2,97} \\ &= \underline{\underline{2,25 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{L}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (\dots) \cdot \frac{\dots \cdot \frac{400 + 2,97}{(400 + 2,97) - 13}}{14,475 - 2,97} \\ &= \underline{\underline{1,63 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

Proband 3: HSA = 14 mm

$$R: e_z = 13,675 \text{ mm} ; P_F = 32 \text{ mm} ; P_N = 29,62 \text{ mm}$$

$$L: e_z = 13,775 \text{ mm} ; P_F = 31 \text{ mm} ; P_N = 29,71 \text{ mm}$$

• Von Irisblatt:

$$\begin{aligned} \textcircled{R}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (14 + 13,675) \cdot \frac{32 - 29,62 \cdot \frac{400 + 3,52}{(400 + 3,52) - 14}}{13,675 - 3,52} \\ &= \underline{\underline{3,58 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{L}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (14 + 13,775) \cdot \frac{31 - 29,71 \cdot \frac{400 + 3,52}{(400 + 3,52) - 14}}{13,775 - 3,52} \\ &= \underline{\underline{0,60 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

• Von Irisbild:

$$\begin{aligned} \textcircled{R}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (\dots) \cdot \frac{\dots \cdot \frac{400 + 2,97}{(400 + 2,97) - 14}}{13,675 - 2,97} \\ &= \underline{\underline{3,40 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{L}: \text{Inset}_{\text{Bgl}} &= (\dots) \cdot \frac{\dots \cdot \frac{400 + 2,97}{(400 + 2,97) - 14}}{13,775 - 2,97} \\ &= \underline{\underline{0,57 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

Vergleich: Geometrischer Inset (Bgl.) zu

Inset umgerechnet
von Iris / Irisbild ($e_v = 3,52 \text{ mm}$) vs. ($e_b = 2,97 \text{ mm}$)

<u>Proband 1:</u>	<u>R</u>	<u>L</u>	<u>Ges.</u>	
Inset _{Bgl} (<u>$e_v = 3,52$</u>)	3,40	-0,19	<u>3,21</u>	Δ 0,39
Inset _{Bgl} (<u>geom.</u>)	1,83	1,77	<u>3,60</u>	Δ 0,56
Inset _{Bgl} (<u>$e_b =$</u>)	3,22	-0,18	<u>3,04</u>	

<u>Proband 2:</u>	<u>R</u>	<u>L</u>	<u>Ges</u>	
— " — (<u>$e_v = 3,52$</u>)	2,38	1,71	<u>4,09</u>	Δ 0,15
— " — (<u>geom.</u>)	2,09	2,15	<u>4,24</u>	Δ 0,36
— " — (<u>$e_b =$</u>)	2,25	1,63	<u>3,88</u>	

<u>Proband 3:</u>	<u>R</u>	<u>L</u>	<u>Ges</u>	
— " — (<u>$e_v = 3,52$</u>)	3,58	0,60	<u>4,18</u>	Δ 0,04
— " — (<u>geom.</u>)	2,14	2,08	<u>4,22</u>	Δ 0,25
— " — (<u>$e_v =$</u>)	3,40	0,57	<u>3,97</u>	

	Proband 1		Proband 2		Proband 3		Proband 4	
Geometrischer Inset Bgl.	<u>3,60</u>	Abweich. A	<u>4,24</u>	Abweich. A	<u>4,22</u>	Abweich. A	<u>3,89</u>	Abweich. A
Geometrischer Inset Iris $e_v = 3,52 \text{ mm}$	<u>1,49</u>	Abweich. B	<u>1,69</u>	Abweich. B	<u>1,55</u>	Abweich. B	<u>1,65</u>	Abweich. B
Inset Pupillometer	3,00	A 0,60 B 1,51	3,40	A 0,84 B 1,71	3,60	A 0,62 B 2,05	2,25	A 1,64 B 0,60
Inset Spiegelmethode	3,50	A 0,10 B 2,01	4,00	A 0,24 B 2,31	4,00	A 0,22 B 2,45	3,00	A 0,89 B 1,35
Inset Kamera (nicht korrig. - Irisblatt)	2,91	A 0,63 B 1,42	3,64	A 0,60 B 1,95	3,67	A 0,56 B 2,11	3,09	A 0,80 B 1,44
Inset Kamera (korrig. - Irisblatt)	1,31	A 2,29 B 0,18	1,63	A 2,61 B 0,06	1,53	A 2,69 B 0,02	1,43	A 2,46 B 0,22
Inset Kamera $e_v = 3,52$ (umgerechnet Bgl.)	3,21	A 0,38 B 1,72	4,09	A 0,15 B 2,40	4,18	A 0,05 B 2,62	3,37	A 0,53 B 1,71
Inset Spiegelmeth. mit Kamera; Statisch	1,48	A 2,12 B 0,01	2,01	A 2,23 B 0,32	2,04	A 2,18 B 0,43	0,60	A 3,29 B 1,05
Inset Spiegelmeth. mit Kamera; Habituell	2,17	A 1,43 B	2,33	A 1,91 B 0,64	2,06	A 2,16 B 0,51		